



**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Postgrados**

Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de humedales importantes para aves acuáticas en las sabanas inundables de la Orinoquía en Colombia

**Diana Lucía Eusse González**

**Richard Resl, Ph.Dc.,** Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Magíster en Sistemas de Información Geográfica

Quito, noviembre de 2013

Universidad San Francisco de Quito  
Colegio de Posgrados

## HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de humedales importantes para aves acuáticas en las sabanas inundables de la Orinoquía en Colombia

**Diana Lucía Eusse González**

Richard Resl, Ph.Dc.

**Director de Tesis**

.....

Anton Eitzenger, MSc.

**Miembro del Comité de Tesis**

.....

Richard Resl, Ph.Dc.

**Director de la Maestría en Sistemas  
de Información Geográfica**

.....

Stella de la Torre, Ph.D.

**Decana del Colegio de Ciencias  
Biológicas y Ambientales**

.....

Víctor Viteri Breedy, Ph.D.

**Decano del Colegio de Posgrados**

.....

Quito, noviembre de 2013

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

---

Nombre: **DIANA LUCÍA EUSSE GONZÁLEZ**

C. I.: 31642254

Quito, noviembre de 2013



## AGRADECIMIENTOS

Al equipo del proyecto Sitios importantes para Aves Acuáticas del Meta y Casanare, Carlitos, Richard, Cesar, Yani y Jei, por haber compartido las largas jornadas de campo y todo su conocimiento para apoyar las decisiones que tuve que tomar en este tiempo.

A los demás integrantes del equipo de Calidris, Pato, Vi y Jessica, Eli y don Miguel, que además de soportarme en este tiempo, me han ayudado con mi trabajo.

A Fernando Castillo, por ser incondicional y el mejor cómplice que alguien puede tener, por entender mis muy buenos y mis muy frecuentes malos momentos durante estos años. Y por permitirme tomar tiempo para terminar esta labor.

A Eliana Fierro, con quien pude discutir varias veces en el transcurso de estos años y no permitió que me sintiera aislada.

A Olguita, Pato, Isadora, Fer y Conchita quienes aceptaron leer las versiones preliminares de este texto y me ayudaron con todo lo que yo no fui capaz de arreglar.

Al programa corporativo de Biodiversidad de Ecopetrol S.A., por apoyar el proyecto Sitios importantes para Aves Acuáticas del Meta y Casanare, del cual hace parte este trabajo.

A la Fundación Cunaguaro, y especialmente a Laura Miranda y Ernesto Roa, por compartirnos los Llanos y querer seguir haciendo cosas con nosotros. Además a todos los propietarios de los sitios importantes, quienes amablemente nos permitieron conocer sus maravillosos sitios y asombrarnos con la cantidad de aves que mantienen.

Al equipo de profesores y tutores de UNIGIS, especialmente a Anton E. quien aceptó ayudarme en este trabajo y además puso a mi disposición sus conocimientos y contactos.

A Carlos Navarro y Beatriz Herrera del CIAT, Germán Poveda J. y Andrés Felipe Duque de la Universidad Nacional y Gerardo Sánchez-Rojas, por haber atendido a mis solicitudes de información prontamente, muchas gracias a todos.

A Luis German Naranjo y Andrés Trujillo de WWF Colombia y a los equipos de los PNN Katios, Sanquianga y Gorgona, quienes me permitieron compartir los espacios de talleres y profundizar más en el tema de evaluaciones de cambio climático.

Finalmente a mi familia, especialmente a mis papas, mi hermanita, mi abuela y Fercho, quienes me han acompañado pacientemente y se han interesado por el desarrollo de mi trabajo, aun cuando no tenían mucha información al respecto.

## RESUMEN

La región de la Orinoquía en Colombia tiene las más grandes extensiones de ecosistemas de humedales del país. Con cerca de 346 000 km<sup>2</sup>, se caracteriza por extensas planicies y numerosos humedales que mantienen importantes procesos ecológicos, sociales y económicos. En la última década, la región sido considerada como un foco de desarrollo económico del país debido a sus recursos naturales, su relieve, la disponibilidad de agua y la distribución actual de la tenencia de la tierra, entre otras.

En la presente investigación, evalué la vulnerabilidad al cambio climático de algunos sitios que mantienen varias especies o gran cantidad de aves acuáticas en la región, en los periodos 2010-2039 y 2020-2049. Seleccioné como variables climáticas el volumen de la precipitación y la temperatura. La precipitación y su distribución intermensual tendrán cambios significativos, mientras que la temperatura aumentará entre 4 y 6%. Encontré que la resiliencia de los sitios (la interacción de la capacidad adaptativa y la afectación por impactos indirectos) tendrá niveles medios y altos. El resultado de este análisis indica que la vulnerabilidad de los sitios será baja para el periodo 2010-2039 y estará en un nivel medio en el periodo 2020-2049, siendo la precipitación la variable que más influye en este resultado. Los sitios en el noreste del área de estudio, serán los más vulnerables, debido a que en esa zona se presentarán las mayores variaciones de precipitación.

## ABSTRACT

The Orinoco Basin has the largest complex of wetlands in Colombia. The more than 346.000 km<sup>2</sup>, of wide plains and numerous wetlands are important to maintain ecological, social en economical processes. Due to its natural resources, topography, water provision, and land tenure regime, the region has been considered a center of economic development within the last decade.

I assessed the vulnerability to climate change of sites that maintain several species or large numbers of waterbirds in the region. For the assessed periods (2010-2039 and 2020-2049), the monthly precipitation would have significant changes and temperature would rise between 4 and 6%. I also found that sites would be medium to high resilient. The results of this analysis indicate the vulnerability of the sites to climate change would be low in 2010-2039 and medium in 2020-2049, precipitation was the variable that most influenced this result. The sites in the northeast of the Basin would be the most vulnerable to climate change due to the greatest variations of precipitation in that area.

## TABLA DE CONTENIDO

|  |     |
|--|-----|
| RESUMEN .....  | 6   |
| ABSTRACT .....   | 7   |
| 1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA.....  | 13  |
| 1.1 Antecedentes: una breve reseña .....   | 16  |
| 1.2 El Problema .....  | 18  |
| 1.3 Hipótesis.....   | 19  |
| 1.4 Pregunta de investigación.....   | 20  |
| 1.5 Contexto y marco teórico .....   | 21  |
| 1.6 Definición de términos .....   | 24  |
| 1.7 Supuestos del estudio .....  | 25  |
| 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA .....  | 26  |
| 2.1 Proceso de revisión de la literatura y géneros de literatura considerados..... | 26  |
| 2.2 Formato de la revisión de la literatura .....                                  | 27  |
| 3 MÉTODOS Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....                                       | 35  |
| 3.1 Área de estudio .....  | 35  |
| 3.2 Diseño de la investigación .....   | 39  |
| 4 ANÁLISIS DE DATOS .....  | 47  |
| 4.1 Exposición a efectos directos del cambio climático.....                        | 47  |
| 4.2 Capacidad adaptativa de los ecosistemas ante el cambio climático .....         | 49  |
| 4.3 Impactos por efectos indirectos del cambio climático.....                      | 55  |
| 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....   | 59  |
| 5.1 Delimitación de unidades de análisis .....                                     | 59  |
| 5.2 Exposición a cambios de precipitación y temperatura.....                       | 61  |
| 5.3 Cuantificación de la Capacidad adaptativa .....                                | 79  |
| 5.4 Impactos por efectos indirectos .....  | 85  |
| 5.5 Resiliencia .....  | 88  |
| 5.6 Vulnerabilidad.....  | 89  |
| 5.7 Sitios importantes para aves acuáticas.....                                    | 91  |
| 6 CONCLUSIONES .....   | 99  |
| 7 REFERENCIAS .....  | 102 |
| ANEXO 1: TIPOS DE SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO .....                                 | 106 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Escenarios de emisiones de acuerdo al desarrollo económico, social y tecnológico. ....  | 31 |
| Figura 2: Concentraciones atmosféricas de CO <sub>2</sub> y N <sub>2</sub> O resultantes de los seis escenarios de emisión (incluido el escenario IS92a)..... | 32 |
| Figura 3: Área de estudio .....   | 36 |
| Figura 4: Ecosistemas de humedales en las sabanas inundables de la Orinoquía en Colombia. ....  | 38 |
| Figura 5: Diagrama de evaluación de vulnerabilidad.....   | 39 |
| Figura 6: Diagrama de flujo que muestra los pasos seguidos para realizar la evaluación. ....  | 44 |
| Figura 7: Modelo de pendientes del área de estudio.....   | 50 |
| Figura 8: Tipos de coberturas vegetales del área de estudio.....  | 51 |
| Figura 9: Tipos de suelos del área de estudio.....  | 53 |
| Figura 10: Unidades de Análisis.....  | 59 |
| Figura 11: Temperatura media mensual del área de estudio .....  | 61 |
| Figura 12: Porcentaje de cambio en temperatura promedio anual en cada unidad de análisis, periodo 2010-2039 .....   | 62 |
| Figura 13: Porcentaje de cambio de temperatura promedio mensual, periodo 2010-2039 .....  | 63 |
| Figura 14: Precipitación media mensual del área de estudio, periodo 2010-2039 ....  | 64 |
| Figura 15: Porcentaje de cambio en precipitación promedio anual en cada unidad de análisis, periodo 2010-2039 .....   | 65 |
| Figura 16: Porcentaje de cambio de precipitación promedio mensual, periodo 2010-2039 .....  | 66 |
| Figura 17: Nivel de exposición por unidad de análisis por área afectada por cambios de temperatura, periodo 2010-2039.....                                    | 67 |
| Figura 18: Nivel de exposición de las unidades de análisis por área afectada por cambios de precipitación, periodo 2010-2039 .....                            | 68 |
| Figura 19: Nivel de exposición máxima en las unidades de análisis, en el periodo 2010-2039 .....  | 69 |
| Figura 20: Temperatura media mensual del área de estudio, periodo 2020-2049 ....  | 70 |
| Figura 21: Porcentaje de cambio en temperatura promedio anual en cada unidad de análisis, periodo 2020-2049 .....   | 71 |
| Figura 22: Porcentaje de cambio de temperatura promedio mensual, periodo 2020-2049 .....  | 72 |
| Figura 23: Precipitación media mensual del área de estudio, periodo 2020-2049 ....  | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 24: Porcentaje de cambio en precipitación promedio anual en cada unidad de análisis, periodo 2020-2049 .....        | 74 |
| Figura 25: Porcentaje de cambio de precipitación promedio mensual, periodo 2020-2049 .....                                 | 75 |
| Figura 26: Nivel de exposición por unidad de análisis por área afectada por cambios de temperatura, periodo 2020-2049..... | 76 |
| Figura 28: Nivel de exposición máxima en las unidades de análisis, periodo 2020-2049 .....                                 | 78 |
| Figura 29: Nivel de capacidad adaptativa por pendiente del terreno en las unidades de análisis.....                        | 79 |
| Figura 30: Nivel de capacidad adaptativa por tipos de coberturas vegetales en las unidades de análisis.....                | 80 |
| Figura 31: Nivel de capacidad adaptativa por área de humedales en las unidades de análisis .....                           | 81 |
| Figura 32: Nivel de capacidad adaptativa por tipos de suelos en las unidades de análisis .....                             | 82 |
| Figura 33: Nivel de capacidad adaptativa por rango de precipitación en las unidades de análisis.....                       | 83 |
| Figura 34: Nivel de capacidad adaptativa por rangos de precipitación en las unidades de análisis.....                      | 84 |
| Figura 35: Nivel de capacidad adaptativa promedio en las unidades de análisis.....   | 85 |
| Figura 36: Nivel de impactos por efectos indirectos en el área de estudio.....   | 86 |
| Figura 37: Nivel de impactos por efectos indirectos en las unidades de análisis .....                                      | 87 |
| Figura 38: Nivel de resiliencia en las unidades de análisis .....  | 88 |
| Figura 39: Nivel de vulnerabilidad en las unidades de análisis, periodo 2010-2039 ..                                       | 89 |
| Figura 40: Nivel de vulnerabilidad en las unidades de análisis, periodo 2020-2049 ..                                       | 90 |
| Figura 41: Sitios importantes para aves acuáticas .....  | 92 |
| Figura 42: Nivel de Capacidad adaptativa en sitios importantes para aves acuáticas .....                                   | 93 |
| Figura 43: Nivel de impactos por efectos indirectos en sitios importantes para aves acuáticas .....                        | 94 |
| Figura 44: Nivel de resiliencia de los sitios importantes para aves acuáticas .....  | 95 |
| Figura 45: Nivel de Exposición de los sitios importantes para aves acuáticas.....  | 96 |
| Figura 46: Nivel de Vulnerabilidad de los sitios importantes para aves acuáticas.....                                      | 98 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla1: Fuentes y recolección de datos.....  | 45 |
| Tabla 2: Niveles de exposición para el porcentaje de cambio de la precipitación y la temperatura entre los periodos futuros y presente ..... | 48 |
| Tabla 3: Niveles de exposición para el porcentaje de área de cambio por meses, entre el futuro y el presente.....                            | 48 |
| Tabla 4: Niveles de Capacidad adaptativa de pendientes.....  | 50 |
| Tabla 5: Niveles de capacidad adaptativa relacionados con el número de tipos de cobertura del suelo por unidad de análisis. ....             | 52 |
| Tabla 6: Niveles de capacidad adaptativa relacionados al número de tipos de suelos.....  | 53 |
| Tabla 7: Nivel de capacidad adaptativa del rango de temperatura y precipitación anual .....  | 54 |
| Tabla 8: Nivel de impacto y distancia de afectación de carreteras.....   | 56 |
| Tabla 9: Nivel de impacto y distancia de afectación de centros urbanos .....   | 57 |
| Tabla 10: Nivel de impacto y distancia de afectación de cultivos .....   | 58 |
| Tabla 11: Unidades de Análisis, área y rango de elevación.....   | 60 |
| Tabla 12: Sitios importantes para las aves acuáticas en la zona de estudio.....  | 91 |

## ABREVIATURAS

**AICAS:** Áreas Importantes para la Conservación de Aves

**ANH:** Agencia Nacional de Hidrocarburos

**CITES:** Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres

**Convención Ramsar:** Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional

**DGPAD:** Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres

**IAvH:** Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt,

**IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

**IPCC:** Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

**MAVDT:** Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial (Antes MMA)

**MMA:** Ministerio de Medio Ambiente

**PNN:** Parques Nacionales Naturales de Colombia



## 1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA

El concepto de conservación actualmente involucra no solo elementos técnicos, sino que articula aspectos sociales económicos y herramientas que permitan detectar cambios tempranos y predecir con cierto grado de certidumbre hacia donde se moverá el sistema. Sabemos que uno de los principales generadores actuales de pérdida de la biodiversidad es el cambio climático, no solo por las variaciones que generará en el sistema climático, sino porque puede acentuar otras causas que están afectando a la flora y fauna del planeta (Comer et al., 2012). Una de las estrategias empleada por gobiernos y sectores ambientalistas, ha sido identificar, evaluar y priorizar áreas que tengan importancia para ser conservadas y enfocar en ellas esfuerzos que permitan garantizar a largo plazo su conservación y la de la biodiversidad asociada (AHN, IAvH, TNC e IDEAM, 2007, Johnston-González y Eusse-González, 2009, Andrade-Pérez y Corzo-Mora, 2011).

Usualmente estos ejercicios consideran solamente la evaluación de la riqueza de especie y de ecosistemas, pero debido a los actuales escenarios de cambio climático y amenazas, se hace necesario involucrar otros análisis tales como la susceptibilidad o vulnerabilidad que tiene un sistema para enfrentar impactos negativos. Así pues, la vulnerabilidad depende de la exposición del sistema a los efectos del cambio climático y de su sensibilidad y capacidad de adaptación al mismo (IPCC, 2007, Quesne, Matthews, Heyden, Levine, & Mcsweeney, 2010). Entender estos elementos, puede ayudar no solo a evaluar la magnitud del cambio, sino también a determinar las causas de vulnerabilidad y adelantar acciones que reduzcan estas presiones y mitiguen los efectos (Marshall et al., 2009).

A nivel mundial uno de los ecosistemas, que se asume se verá más afectado en los próximos 50 años por las transformaciones climáticas, es el de humedales y consecuentemente las dinámicas socioeconómicas y ecológicas asociados a ellos (IPCC, 2007, Quesne et al., 2010). Esta afectación será debida

principalmente a los cambios en la precipitación, que afectará el volumen de agua disponible en las cuencas y al aumento en la temperatura, que aumentará la evapotranspiración y con ello el balance hídrico de los ecosistemas. Sin embargo, debemos mejorar el conocimiento a escala local de dichos impactos sobre la dinámica hídrica de estos ecosistemas, la biodiversidad y el mantenimiento de poblaciones humanas (Marshall et al., 2009).

Las condiciones de alta biodiversidad, la importancia en la dinámica social de las regiones y la alta vulnerabilidad ante el cambio climático, deben ser tenidas en cuenta en los planes de conservación de sitios y especies asociadas a ecosistemas acuáticos. Para esto es importante, conocer el grado de vulnerabilidad de los sitios, lo cual permitirá la priorización dentro de portafolios de áreas protegidas o de importancia para la conservación, y facilitará, a mediano plazo, aumentar la gestión en la conservación de la biodiversidad a diferentes escalas (IAvH, WWF-Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle y Universidad Nacional, 2010).

En Colombia, la región denominada Orinoquía hace parte de la cuenca del río Orinoco, es una de las más importantes en términos de ecosistemas de humedales debido al régimen de precipitación, al tipo de suelo y al relieve plano. Esta región ocupa aproximadamente el 30% del territorio nacional, del cual cerca del 60% corresponde a ecosistemas de humedales temporal o estacionalmente (Romero, Galindo, Otero y Armenteras, 2004). Dada su extensión y la alta diversidad de ecosistemas de humedales, las sabanas inundables de la Orinoquía en Colombia constituyen una de las principales áreas para las aves acuáticas. En esta zona se han registrado 80 especies de aves acuáticas, tres de las cuales tienen algún grado de riesgo de extinción, 12 están en los apéndices de CITES (<http://www.cites.org/esp/disc/what.php>, acceso junio 2012), 16 especies migratorias y 9 con poblaciones tanto residentes como migratorias (Ruiz-Guerra, Eusse-González y Arango, 2013).

Teniendo en cuenta la importancia en términos de biodiversidad y los procesos socioeconómicos que se desarrollan en las sabanas inundables de región de la Orinoquía, me propuse juntar elementos que permitieran evaluar la vulnerabilidad ante eventos de cambio climático de la mencionada región. Para esto empleé un Sistema de Información Geográfico, que me permitió sobreponer y evaluar la información y además cuantificar la extensión y la magnitud de los impactos de cambio climático en el área de estudio.

## 1.1 Antecedentes: una breve reseña

### *Humedales y aves acuáticas en la Orinoquía colombiana*

En años recientes se ha avanzado en la planificación regional de la Orinoquía colombiana debido que se ha identificado como el nuevo polo de desarrollo económico para Colombia (DNP 2011). Por esta razón se inició un proceso de priorización de áreas que sugiere orientar intervenciones e inversiones en conservación (IAvH et al., 2010). Dado la gran cantidad de ecosistemas acuáticos como lagunas, bosques inundables, morichales y los que se forman con los pulsos de inundación entre otros, el componente de avifauna acuática es uno de los más notorios de la región, por su abundancia, riqueza y singularidad.

Las aves acuáticas son las que dependen del agua durante alguna parte de su ciclo vital. En Colombia, se han registrado 295 especies de aves acuáticas (15% del total de aves de Colombia), de las cuales 15 especies (5%) presentan algún grado de riesgo de extinción (Renjifo, Franco-Amaya, Amaya-Espinel, Kattan y Lopez-Lanus, 2002) y de las 275 especies migratorias identificadas en el país, 120 son acuáticas (cerca del 43%), (Naranjo y Amaya, 2009). El 36% de las aves acuáticas de Colombia ha sido registrado en la región Orinoquía (Asociación Calidris, datos sin pub.). Por esta razón, contar con elementos de evaluación y manejo de hábitat de estas especies es altamente pertinente para proponer acciones que permitan mantener poblaciones sanas en todo su rango de distribución (Johnston-González et al., 2010).

Por el tipo de comportamiento reproductivo o trófico de las aves acuáticas, uno de los aspectos más importantes en su estudio es la cantidad de individuos presentes en un sitio. Esta información ha permitido crear criterios para evaluar la importancia de áreas y proponerlas en portafolios o directorios de conservación como las Áreas Importantes para la Conservación de Aves –AICAS (BirdLife International y Conservation International, 2005), Humedales de Importancia Internacional (Convención Ramsar) o las Reservas de importancia hemisférica para aves playeras (<http://www.whsrn.org/es/sitios/uniendose-la-rhrap/criterios-de-seleccion>, acceso mar-12). Entre las áreas identificadas como importantes en las llanuras inundables del Meta y Casanare se puede destacar los humedales de

Paz de Ariporo, el río Meta, la cuenca del río Cusiana y los arrozales de Meta y Casanare (Johnston-González y Eusse-González, 2009; Lasso, Usma, Trujillo y Rial, 2010; Andrade-Pérez y Corzo-Mora, 2011).

### ***Cambio climático y evaluaciones de vulnerabilidad en ecosistemas de humedales***

Después de varios años de investigaciones, se cuenta con un soporte confiable respecto a qué recursos y bienes de los humedales son altamente vulnerables y cuales están siendo fuertemente impactados por el cambio climático (Quesne et al., 2010). Entre las transformaciones más relevantes que se esperan están los cambios en las dinámicas de inundación, incremento en la evapotranspiración, reducción de la columna de agua y cambios en la calidad, cantidad y estacionalidad del agua (IPCC, 2007; Quesne et al., 2010). Estos impactos además están siendo agravados por actividades antrópicas como la ganadería intensiva, contaminación de acuíferos, introducción de especies, construcción de infraestructura humana entre otras, generando una rápida degradación de estos sistemas naturales (IPCC, 2007, Marshall et al., 2009).

Para planear posibles rutas de conservación o manejo de humedales, en estos escenarios, se deben adelantar ejercicios de evaluación de la vulnerabilidad a este fenómeno. La vulnerabilidad al cambio climático ha sido definida como el grado en que un sistema es susceptible a, o incapaz de afrontar los efectos adversos (IPCC, 2007). Una evaluación de este tipo incluye los componentes sensibilidad, exposición y capacidad adaptativa de los sistemas. La sensibilidad está determinada por las características intrínsecas del sistema, mientras que la exposición se relaciona con los factores extrínsecos. La capacidad adaptativa se refiere a caracteres evolutivos o plasticidad ecológica, con las que las especies (o sistema) pueden responder integralmente al cambio climático (Gardali, Seavy, DiGaudio y Commarck, 2012). El entendimiento de estos elementos, puede ayudar no solo a evaluar la magnitud, sino también a determinar las causas de la vulnerabilidad y definir acciones que reduzcan estas presiones (Marshall et al., 2009).

## 1.2 El Problema

Los impactos de cambio climático sobre los humedales, son poco conocidos a escalas locales. Sin embargo, modelos a escala de países y de regiones muestran que los humedales serán afectados con diferente intensidad, magnitud y frecuencia, por lo que se deben tener en cuenta aspectos de la naturaleza de los humedales y de las presiones a la que están sometidos (Quesne et al., 2010). Estos cambios en la dinámica general de los humedales, pueden impactar también a la biodiversidad asociada y los procesos sociales y económicos que dependen de estos ambientes.

Colombia ha avanzado en el conocimiento de la evidencias del cambio climático a nivel de país y de la afectación de algunos humedales y cuencas hidrográficas de la región andina (MAVDT e IDEAM, 2010). La Orinoquía colombiana en cambio aún es desconocida, no solo en estos escenarios cambiantes, sino en aspectos básicos de ecología, biología y de bienes y servicios que algunos ecosistemas acuáticos ofrecen (Lasso et al., 2010). Uno de los principales componentes de la biodiversidad en los humedales de la Orinoquía colombiana son las aves acuáticas. Este grupo es principalmente migratorio, por lo que su presencia depende de lo que pase en un rango geográfico amplio y su cronología anual está muy ligada a las estaciones climáticas anuales (Naranjo y Amaya, 2009).

En este sentido cobra gran relevancia conocer la vulnerabilidad de la sabanas inundables de la Orinoquía ante escenarios de cambio climático no solo pensando en la avifauna acuática, sino también en aspectos socioeconómicos. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante evaluar la magnitud e intensidad de los impactos que están poniendo en riesgo sistemas naturales y antrópicos en el país. El uso de herramientas de análisis espacial permite cuantificar la magnitud de los efectos e indicar la extensión espacial de los mismos, además de producir representaciones gráficas que mejoran la interlocución a diferentes niveles de la sociedad y que pueden ser incluidas en planes de ordenamiento territorial y zonificación de tierras.

### **1.3 Hipótesis**

La hipótesis que espero poner a prueba en la presente investigación es que la magnitud de la afectación ante el cambio climático de humedales en las sabanas inundables de la Orinoquía en Colombia, depende de la interacción de efectos directos e indirectos del cambio climático y por la capacidad adaptativa de dichos sistemas.

Entre los efectos directos se cuentan cambios en los regímenes hidrológicos de precipitación y escorrentía y aumento de temperatura. Por su parte los efectos indirectos se relacionan con la fragmentación de hábitat, aumento de agentes contaminantes en el agua y en el aire, desarrollos urbanísticos y económicos, entre otros. Los sistemas tienen características especiales que condicionan su respuesta frente a estos impactos, lo cual se conoce como la capacidad de adaptación. Esta capacidad adaptativa se relaciona con los componentes de biodiversidad que interactúan en los humedales y con factores abióticos que mantienen el ecosistema.

## 1.4 Pregunta de investigación

¿Cómo y en qué magnitud afectarán los impactos futuros del cambio climático a los sitios importantes para la conservación de las aves acuáticas en las sabanas inundables de la Orinoquía (departamentos de Meta y Casanare, Colombia) en los próximos 50 años?

### **Objetivo general:**

Evaluar la vulnerabilidad ante el cambio climático de humedales importantes para aves acuáticas en las sabanas inundables de la Orinoquía colombiana.

### **Objetivos específicos:**

- Proponer indicadores de vulnerabilidad que permitan a futuro definir acciones de conservación y ayudar al ordenamiento territorial.
- Priorizar sitios importantes para la conservación de aves acuáticas, teniendo en cuenta los requerimientos de las especies y considerando el análisis de vulnerabilidad ante cambio climático



## **1.5 Contexto y marco teórico**

Esta investigación está encaminada a evaluar la vulnerabilidad ante los efectos de cambio climático que pueden tener unas áreas importantes para la conservación de la avifauna acuática en las sabanas inundables de la Orinoquía colombiana. Con este trabajo, espero hacer una propuesta metodológica para llevar a cabo estas evaluaciones y además permitir que los resultados puedan ser usados en la planeación de la conservación de sitios importantes para las aves o en procesos de ordenamiento territorial.

La evaluación de la vulnerabilidad se basará en la combinación de la exposición a efectos directos del cambio climático y a efectos indirectos (con origen diferente al cambio climático) y la capacidad adaptativa o resiliencia de dichos ecosistemas. Los elementos que se tendrán en cuenta como efectos directos e indirectos del cambio climático y como capacidad adaptativa, hacen parte del contexto social, económico, cultural y ambiental de los humedales, así como de la ecología propia de los mismos.

Para esta evaluación en particular, que tiene que ver con priorización de áreas, el uso de las herramientas de SIG es otro de los puntos a resaltar del presente trabajo. Lo que espero lograr con esto, es poder usar los recursos que ofrecen estos sistemas en la integración de información y la capacidad de dar una dimensión espacial a situaciones que en la realidad ocurren de manera difusa o en forma de gradiente. Así mismo, los productos cartográficos que generan los SIG son altamente útiles en la transferencia de conocimiento y en la identificación del territorio por parte de los diferentes actores.

### **1.5.1 El propósito del estudio**

Con esta investigación espero poder evaluar la vulnerabilidad de algunos sitios importantes para las aves acuáticas ante impactos de cambio climático. Los resultados de mi evaluación podrán ser usados para priorizar acciones de conservación en el hábitat y la biodiversidad de dichos sitios en el área de

estudio, así como en su designación en portafolios de conservación y manejo o en la declaración de áreas protegidas.

Los resultados cartográficos son altamente visibles, por lo que espero poder impactar diferentes públicos con estos resultados. Además, estos insumos pueden ser fácilmente incluibles en otros sistemas de información, por lo que espero que los resultados de mi trabajo puedan ser usados por diversos actores como autoridades ambientales y gubernamentales, instituciones académicas y de investigación, manejadores de áreas y la comunidad en general, entre otros.

### **1.5.2 El significado del estudio**

La región seleccionada como área de estudio, fue priorizada por el portafolio de conservación y desarrollo sostenible del país, liderada por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt –IAvH (ANH et al., 2007; IAvH et al., 2010). Este estudio aportará insumos e información técnica para la toma de decisiones de conservación e intervención del territorio.

Específicamente, este estudio permitirá la identificación de riesgos por efecto del cambio climático en los ecosistemas de humedales de las sabanas inundables de la Orinoquía en Colombia, para que las autoridades ambientales y comunidades locales directamente afectadas o implicadas, puedan adelantar acciones de conservación, manejo, adaptación o mitigación en zonas vulnerables.

Además de la priorización de áreas, los resultados del presente trabajo pueden ser la línea base de actividades de monitoreo y seguimiento de efectos de cambio climático en ecosistemas de humedales de la región. Estos monitoreos pueden hacer parte de las actividades realizadas por las autoridades ambientales regionales (Corporaciones Autónomas) y nacionales (Parques Nacionales y Ministerio de Medio Ambiente) de Colombia, por lo que estos resultados podrán ser incluidos en las agendas de trabajo de estas instituciones.

La propuesta metodológica que presento, combina métodos de identificación, categorización y mapeo de variables para evaluar la vulnerabilidad de especies en

áreas protegidas de Colombia y en diferentes sitios en el mundo (Quesne et al., 2010, WWF-Colombia y Parques Nacionales de Colombia, com. pers.). En este trabajo, me propongo integrar esta metodología a una herramienta de SIG, que me permita definir criterios de vulnerabilidad de manera espacial y que produzca mapas indicando los grados de amenaza de los sitios. Espero que esta metodología sirva en próximos estudios de vulnerabilidad para otras zonas del país y que vincule además el aporte de las comunidades locales en dicha evaluación. Finalmente, espero poder dar a conocer estos resultados a las comunidades aledañas y actores interesados en los humedales y demás sitios evaluados, pues serán ellos los que enfrentarán los efectos del cambio climático directamente y los que pueden liderar y apoyar estrategias de adaptación y mitigación al mismo.

## 1.6 Definición de términos

|   |   |
|---|---|
| Abundancia de una especie               | Número de individuos de una especie   |
| Aves acuáticas                          | Son las que dependen de los humedales durante alguna parte de su ciclo vital  |
| Cambio climático                        | Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (Normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos (IPCC, 2007). |
| Capacidad adaptativa                    | El potencial o la capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático, incluyendo la variabilidad y los extremos climáticos, a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las oportunidades, o para hacer frente a las consecuencias (Comer et al., 2012)  |
| Efectos directos del cambio climático   | Exposición actual y futura al cambio climático y sus posibles efectos sobre los sistemas, pueden tener implicaciones en el estrés creciente de los ecosistema, cambios en los procesos dinámicos, como los incendios forestales o el régimen hidrológico, como también el cambio en la composición de especies (Comer et al., 2012).  |
| Efectos indirectos del cambio climático | Predisposiciones de los sistemas que afectan la resiliencia ecológica, estos pueden ser fragmentación del paisaje, especies invasoras, o alteraciones humanas a procesos dinámicos y se consideran independientes del cambio climático, pero con posibilidad de interacción (Comer et al., 2012).                                     |
| Escenarios de cambio climático          | Resultado plausible y consistente que ha sido construido para explicar las consecuencias potenciales de las actividades humanas sobre el clima (Jones et al., 2004). Los 40 escenarios resultantes abarcan las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas (IPCC, 2001).  |
| Exposición                              | Grado de estrés al que está expuesto un sistema, de acuerdo a la duración, magnitud y frecuencia o por cambios en la variabilidad climática (Comer et al., 2012).   |
| Humedales                               | Zonas donde el agua modula las relaciones bióticas y abióticas, pueden ser de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas (MMA, 2002; Convención Ramsar, 2006).   |
| Modelos de Circulación General (MCG)    | Predicciones del clima, que simulan flujos de energía, masa y cantidad de movimiento entre atmósfera, océanos y las capas superiores de la litosfera y la criósfera, a partir de escenarios de concentraciones de gases invernadero producidos por diferentes tendencias de la actividad humana (IPCC, 2007).                         |
| Resiliencia                             | Capacidad de un sistema de hacer frente a los efectos adversos (climáticos), asegurando que los procesos ecológicos críticos o la integridad ecológica se restauran en un alto nivel de función (Comer et al., 2012).   |
| Riqueza de especies                     | Número de especies  |
| Sensibilidad                            | Grado en que un sistema se ve afectado por o en respuesta a estímulos climáticos (Comer et al., 2012).  |
| Sitios Importantes                      | Sitios con más de 500 individuos, más de 15 especies o con procesos importantes (dormidero o reproducción) de aves acuáticas (este estudio)   |
| Vulnerabilidad                          | Grado en que un sistema es susceptible a efectos adversos del cambio climático. Es función de la exposición al evento climático y a la sensibilidad y capacidad adaptativa del sistema (IPCC, 2007).  |

## 1.7 Supuestos del estudio

- Usé el escenario A2 (IPCC, 2000) que es el con el que se esperan niveles de emisiones de gases invernadero altos, sociedades creciendo exponencialmente, alto uso de combustibles fósiles. Este escenario supone que el aumento en los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y en sus dinámicas será el máximo esperado, por lo que se le conoce también como escenario pesimista.
- En los próximos 50 años, no habrá aumentos significativos en el índice poblacional y en el desarrollo económico del área de estudio.
- Las poblaciones de aves estarán siendo afectadas solamente por las amenazas en el área de estudio y no fuera de ella.
- Las áreas mantendrán el mismo estatus de manejo o protección en los escenarios futuros, lo cual no contribuirá a reducir las presiones frente al cambio climático.

A continuación se encuentra el capítulo sobre revisión de la literatura, seguido de la explicación de los métodos de investigación aplicada, el análisis de datos encontrados y las conclusiones y discusión.

## 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1 Proceso de revisión de la literatura y géneros de literatura considerados

Para generar los temas de revisión de literatura, usé los puntos clave planteados en mi problema de investigación y en los resultados obtenidos y busqué textos, investigaciones y ejemplos que me permitieran organizar y apoyar los métodos y analizar y discutir los resultados obtenidos. Entre los temas escogidos están el contexto ecológico, geográfico y social del área de estudio; las evidencias y escenarios de cambio climático a nivel mundial y en Colombia y los retos que reviste esta situación en la conservación de la biodiversidad y el desarrollo socioeconómico de las sociedades y finalmente, métodos y ejemplos de cómo llevar a cabo un análisis de vulnerabilidad al cambio climático y el papel de los SIG en estos procesos.

Las fuentes de referencias bibliográficas son informes, artículos, conferencias publicaciones oficiales y actualizadas del Panel Intergubernamental de Cambio Climático -IPCC (<http://www.ipcc.ch/>) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia-IDEAM (<http://institucional.ideam.gov.co>). También publicaciones y procesos de investigación y de evaluación de vulnerabilidad de otras organizaciones que trabajan con cambio climático y en conservación o investigación de especies o ecosistemas. Para esto revise las páginas de WWF-Colombia (<http://www.wwf.org.co/>), Nature Server (<http://www.natureserve.org/>), el Banco Mundial (<http://www.worldbank.org/>), BirdLife International (<http://www.birdlife.org/>), entre otras.

Adicionalmente busque artículos científicos usando motores de búsqueda como JSTOR (<http://www.jstor.org/>), *Wiley Online Library* (<http://onlinelibrary.wiley.com/>), *Searchable Ornithological Research Archive - SORA* (<http://elibrary.unm.edu/sora/>), usando como palabras claves cambio climático, evaluación de vulnerabilidad de especies o de ecosistemas, aves

acuáticas y humedales. Revise las referencias de estos artículos para encontrar referencias de otros artículos o resultados de investigaciones. También asistí a algunos simposios y talleres sobre cambio climático y análisis de vulnerabilidad de especies y de ecosistemas<sup>1</sup>. Estos eventos me permitieron conocer del tema, pero además hacer contacto con algunos investigadores y conocer de primera mano los resultados de sus investigaciones y el uso de diversas herramientas. Los conferencistas y facilitadores de estos eventos me orientaron con literatura relacionada.

La información sobre de aves acuáticas y humedales de Colombia fue encontrada en la biblioteca y la base de datos de la Asociación Calidris, las cuales contienen gran cantidad de información sobre este tema para Colombia y las Américas. Una vez terminé la revisión de esta información, empecé a separar los documentos por los tópicos antes definidos y a seleccionar los textos e ideas que podían ilustrar adecuadamente mi caso.

## **2.2 Formato de la revisión de la literatura**

En este documento presento la revisión y exposición de referencias bibliográficas por temas relevantes a mi problema de investigación y como apoyo a los resultados obtenidos en mis análisis del presente trabajo. Los siguientes títulos corresponden a los temas que seleccioné para revisar la literatura.

---

<sup>1</sup> -Climate Change and Natural Resources Management (CCNRM) International Seminar. US Forest Service-International Program & UC Davis, California, USA, Mayo 6-27, 2012  
 -Análisis de vulnerabilidad al cambio climático del Parque nacional Natural Los Katíos y su zona de influencia". Parque Nacional Natural Los Katíos y WWF-Colombia, Medellín, Colombia, 17 y 18 de septiembre 2012.  
 -Taller de presiones y Amenazas de los PNN Gorgona y Sanquianga, Cali, Colombia, 7 y 8 de febrero de 2013.

### **2.2.1 Las aves acuáticas y los sitios importantes para su conservación en la Orinoquía colombiana**

Las aves acuáticas son las que dependen de los humedales durante alguna parte de su ciclo vital. Por esta estrecha relación es evidente que este grupo de animales constituye un componente de consideración en la dinámica de estos ecosistemas. Las sabanas inundables de la Orinoquía colombiana se ubican en zonas planas con suelos pobremente drenados, donde se hay ambientes acuáticos permanentes, como lagunas, bosques inundables o morichales, o temporales por inundaciones periódicas (Rosales, Suarez y Lasso, 2011). Dado la proporción de área que ocupan estos ecosistemas, el componente de avifauna acuática es uno de los más importantes de esta región. Sin embargo la distribución de las poblaciones, la conectividad y los movimientos migratorios de algunas especies y las implicaciones sobre el manejo de ecosistemas naturales y transformados, aún no es clara para esta región (Restrepo, Lentino y Naranjo, 2010, Zamudio, Ortega y Castillo, 2011).

En Colombia, se han registrado 295 especies de aves acuáticas (15% del total de aves de Colombia), de las cuales 15 presentan algún grado de riesgo de extinción (Renjifo et al., 2002). Adicionalmente de las 275 aves migratorias identificadas en el país, 120 son acuáticas (cerca del 43%) (Naranjo y Amaya, 2009). Del componente de aves acuáticas de Colombia, el 36% ha sido registrado en la Orinoquía (Asociación Calidris, datos sin pub.). Otro aspecto interesante de la avifauna acuática es que conforman numerosas colonias durante la época reproductiva, por lo que la oferta alimenticia debe ser también muy alta en los sitios de reproducción, constituyéndose en punto críticos durante su ciclo de vida (Ruiz-Guerra et al., 2013).

En años recientes se ha avanzado en la planificación regional de la Orinoquía colombiana, identificándose áreas prioritarias sobre las cuales se sugiere orientar intervenciones e inversión en conservación (IAvH et al., 2010). Sin embargo en el momento no se cuentan con sitios delimitados, designados o declarados dentro de los sistemas de áreas protegidas regionales o nacionales, que permitan la



gestión de la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos en la región (Andrade-Pérez y Corzo-Mora, 2011).

### **2.2.2 Qué es el cambio climático y cuáles son sus causas**

El cambio climático se refiere a las variaciones climáticas, principalmente en los patrones de precipitación y temperatura relacionadas con actividades antrópicas a mediano y largo plazo. El cambio climático se suma a la variabilidad climática natural, que se refiere a los eventos climáticos extremos y más frecuentes, observada durante periodos de tiempo comparables (IPCC, 2007). Estos cambios están influyendo a nivel global en los procesos e interacciones atmosféricos y además están modificando la variabilidad normal del clima. Se han identificado como causas del cambio climático el aumento de gases de efecto invernadero (vapor de agua, dióxido de carbono- $\text{CO}_2$ , ozono- $\text{O}_3$ , metano- $\text{CH}_4$  y óxido nítrico- $\text{N}_2\text{O}$ ) y otros factores relacionados con actividades humanas (IPCC, 2001). El aumento de estos gases altera el intercambio de radiación proveniente del sol entre el espacio y la tierra, así como la redistribución de energía al interior de la atmósfera, entre el océano y los continentes. El fenómeno antes descrito es lo que se conoce como efecto invernadero y es el responsable del calentamiento global que actualmente estamos sintiendo (IPCC, 2007).

Entre las evidencias del cambio climático se han documentado alteraciones en variables climáticas como la temperatura y el volumen y cronología de la precipitación. Se ha demostrado desde finales del siglo XIX aumentos de temperatura de entre  $0.4$  a  $0.8^\circ\text{C}$  en la superficie del mar y en el aire marino y terrestre. La temperatura media de la superficie terrestre ha aumentado  $0.6^\circ\text{C}$  ( $\pm 0.25$ ) en el Siglo XX. Así mismo la temperatura de la atmósfera aumentó en  $0.1^\circ\text{C}$  por decenio en los 8 km inferiores, con el consecuente agotamiento del ozono estratosférico y los aerosoles atmosféricos y cambios en el fenómeno de El Niño-La Niña (IPCC 2007, MAVDT e IDEAM, 2010).

De igual manera la precipitación global ha venido presentado cambios en su volumen y distribución temporal y espacial. En promedio, la precipitación en latitudes medias y altas ha aumentado entre  $0.5$  y  $1\%$  por decenio y  $0.2$  y  $0.3\%$  en

los trópicos. Respecto a la precipitación, en las zonas de alta montaña se ha notado una disminución en eventos extremos de lluvias y un aumento en las precipitaciones de alta intensidad en zonas tropicales, templadas y frías (MAVDT e IDEAM, 2010).

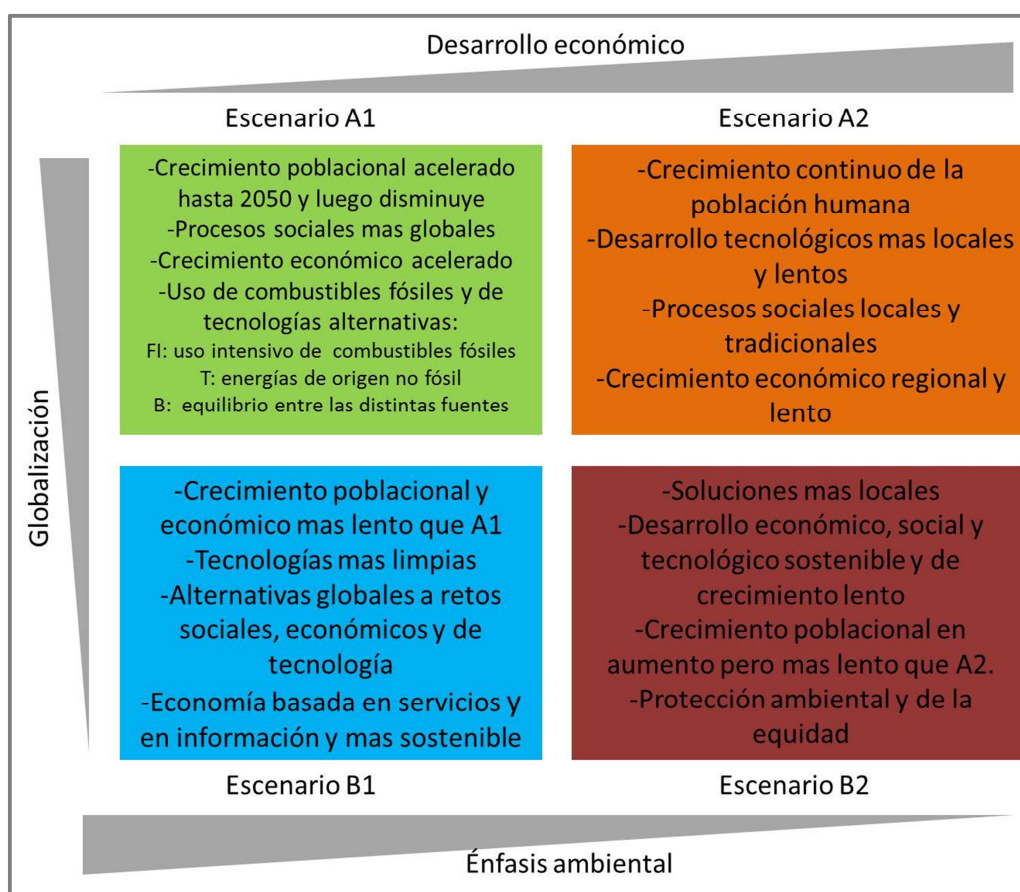
El aumento en la temperatura y la precipitación ha tenido consecuencias en otras variables climáticas y biofísicas a nivel global, como el aumento del nivel del mar y en el albedo; cambios en regímenes de vientos y en el calentamiento diferencial de los continentes y océano. Se ha documentado que en Colombia el fenómeno de El Niño-La Niña ha sido más frecuente, persistente e intenso desde mediados de los años 70, en comparación con los 100 años anteriores (MAVDT e IDEAM, 2010). Así mismo, en Colombia la Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres registró entre los años 1950 y 2007 un aumento del 16% de desastres asociados con las lluvias durante los años de ocurrencia de La Niña y un 216% de desastres asociados con la sequía producida en años de El Niño, respecto a años normales (Velasquez y Rosales, 2003).

Por otra parte, algunos efectos del cambio climático están siendo agravados por alteraciones de origen antrópico, aumentando la afectación en los sistemas naturales, como es el caso de la disminución del albedo de la tierra por la disminución de zonas de glaciares por aumento de temperatura y por la deforestación de bosques que mantienen nieve una parte o todo el año. La disminución del albedo a su vez, está contribuyendo con el aumento de la temperatura global (IPCC, 2001).

Los procesos climáticos cambiantes además, están afectando un sinnúmero de procesos sociales y económicos que aumentan el riesgo de comunidades humanas frente al cambio climático. Por ejemplo enfermedades como dengue, malaria y leishmaniasis están cambiando su distribución en zonas tropicales. Adicionalmente la contaminación de fuentes de agua está aumentando su incidencia. Otros efectos del cambio climático, son la pérdida de cosechas por inundaciones y sequías y por cambios en la cronología anual de la precipitación (MAVDT e IDEAM, 2010).

### 2.2.3 El clima futuro

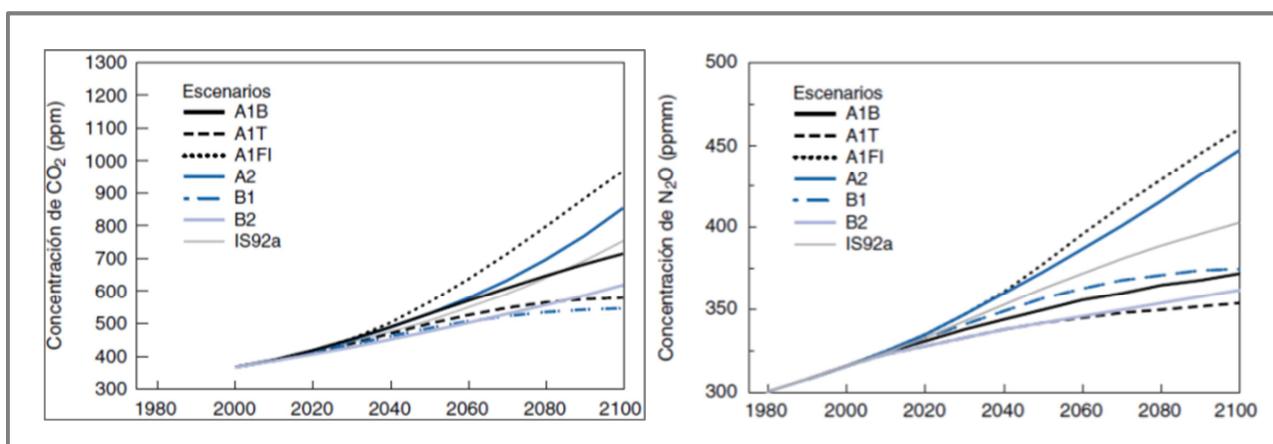
Para poder evaluar los impactos del cambio climático se han elaborado escenarios que tienen en cuenta el desarrollo económico, social y tecnológico y que permiten predecir con cierto grado de incertidumbre los cambios en precipitación y temperatura en las siguientes décadas (Ruiz-Murcia, 2007). Estos escenarios han sido contruidos a partir de cuatro posibles direcciones que pueden tomar el crecimiento de la población humana, el desarrollo económico, el uso de combustibles fósiles y el uso de diferentes tecnologías verdes (Figura 1). Dichos escenarios han permitido además proponer algunos modelos de circulación general atmosférica que tratan de simular las relaciones atmosfera-oceano-tierra en dichos escenarios (IPCC, 2007).



**Figura 1: Escenarios de emisiones de acuerdo al desarrollo económico, social y tecnológico.**

Modificado de IPCC, 2007.

Los diferentes escenarios, ofrecen trayectorias muy diferentes de la concentración de algunos gases de efecto invernadero, por lo que las proyecciones a futuro tienen mucha incertidumbre y una alta variabilidad en el tiempo. En la Figura 2 se muestra la concentración atmosférica de dióxido de carbono y óxido nítrico en diferentes escenarios. Las trayectorias de las curvas producen que en los escenarios A1FI (uso intensivo de combustibles fósiles y crecimiento poblacional acelerado) y A2 (crecimiento económico acelerado y poco ambiental) ocurra un mayor aumento de estos dos gases, mientras que los escenarios con uso de tecnologías limpias, una disminución en la concentración de dichos gases.



**Figura 2: Concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O resultantes de los seis escenarios de emisión (incluido el escenario IS92a).**

Fuente: IPCC, 2001, pag 54

Para el caso de Colombia, los escenarios de cambio climático predicen un aumento en la temperatura y modificaciones en la estacionalidad y la distribución espacial de la precipitación. Se ha documentado un aumento de la temperatura media del aire, de 0,13°C/ década, aumentos de 0,1%/año ( $\pm 1\%$ /década), en el caso de la humedad relativa y reducciones en la precipitación mayores o iguales al 10% en algunos departamentos de la región andina. Así mismo se esperan aumentos de temperaturas extremas con episodios de calor extremo (MAVDT e IDEAM, 2010).

Regionalmente se ha evidenciado una variación de la temperatura media con aumentos significativos en gran parte de la región Caribe y Andina (aumentos de 3°C) y un aumento de más de 4°C en el alto y medio Magdalena y Catatumbo. Por su parte, regiones como el río Sogamoso, Sábana de Bogotá, noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta, cuenca del Cesar y del río Patía, que presentan actualmente bajos porcentajes de humedad, aridez y problemas para el abastecimiento del agua para la sociedad, sufrirán un incremento de la temperatura entre 2°C y 4°C. De igual manera, para el fin de siglo XXI, en los departamentos de Huila, Putumayo, Nariño, Cauca, Tolima, Córdoba, Bolívar y Risaralda, habrá zonas donde las lluvias se reducirían cerca del 15%. En contraste, se espera que algunas zonas del Choco, se presenten aumentos de la precipitación cercanos al 10% (MAVDT e IDEAM, 2010).

#### **2.2.4 El cambio climático y los servicios ecosistémicos de los humedales**

Los ecosistemas de humedales prestan un sinnúmero de servicios ecosistémicos, entre los que se cuentan la recarga y descarga de acuíferos, control de inundaciones, retención de sedimentos, redistribución de nutrientes, soporte de cadenas tróficas y hábitat de vida silvestre, recursos pesqueros, de forraje y nutrientes, entre muchos otros (MMA, 2002). Dichos servicios se verán afectados por el cambio climático de diversas maneras (Quesne et al., 2010). Entre los impactos esperados en los ecosistemas de humedales, están el incremento de episodios de bajo flujo de agua, el cambio en la cronología de inundaciones, aumento en la evaporación de cuerpos de agua, flujos torrenciales más fuertes y frecuentes, cambios en la estacionalidad y estratificación termal en los columna de agua de los humedales, incremento en la salinidad en estuarios y aumento de la cuña salina en el continente, aumento en la escorrentía y en la consecuente arrastre de sedimentos y contaminantes y cambios en el oxígeno disuelto en los cuerpo de agua (Quesne et al., 2010).

Estos cambios en los servicios ecosistémicos de los humedales, tendrán impactos en los procesos biológicos, geoquímicos y sociales que están relacionados con los humedales. Entre los impactos a la biodiversidad está la reducción de los hábitats disponibles para fauna y flora, afectación en la

cronología de desove, arrastre de organismos bentónicos y del fondo de los cuerpos de agua por efecto de las inundaciones, cambio en la temporalidad de la disponibilidad de agua, modificación de relaciones biológicas que dependen de los humedales (migraciones de organismos), eutrofización y aumento de la salinidad y contaminantes y disminución de oxígeno disuelto (Quesne et al., 2010).

En Colombia, los resultados de los análisis de vulnerabilidad al cambio climático en ecosistemas de humedal, muestran que las áreas con impactos muy altos estarían en los departamentos de Bolívar, Magdalena, Cesar, Santander, Tolima y Amazonas y en la región de la Orinoquía, donde hay cerca de 220.000 hectáreas en dichos ecosistemas (IDEAM, 2008). Se espera que los efectos del cambio climático, sean más intensos en las regiones húmedas, con caudales poco variables y sean más pronunciados en humedales de agua dulce de interior, debido al cambio en la cronología de la precipitación y a eventos extremos asociados con sequías, tempestades, inundaciones con mayor frecuencia de ocurrencia (IPCC, 2007).

### 3 MÉTODOS Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a las sabanas inundables del corredor fluvial alto del río Meta en el Orinoco colombiano. Está delimitado por el río Meta al suroriente, con la cuenca del río Upia (límite del departamento del Meta y el Casanare) al suroccidente; al nororiente con la cuenca del caño La Hermosa y el río Casanare y en el noroccidente por la cota de 3700 m; entre las coordenadas geográficas 6°3'50.1" y 4°15'34.08" latitud norte y 73°10'26.29" y 70°12'54.39" longitud occidental (Figura 3). El área de estudio se extiende desde los 100 m de elevación en el río Meta hasta 3500-3700 m en la cordillera Oriental. Usé esta cota altitudinal para mantener la integralidad de las cuencas hidrográficas, aunque la región de los Orinoquía está circunscrita a la cota 1500 m en la cordillera Oriental de los Andes (Rosales et al., 2010). Esta área está en los departamentos de Casanare y Boyacá, este último corresponde principalmente a las partes altas del área de estudio

La cuenca del río Orinoco tiene un clima tropical en el que se pueden diferenciar dos épocas climáticas con cambios sustanciales en las precipitaciones más que en las temperaturas. La época lluviosa se extiende de abril a noviembre, con más de 600 mm de precipitación mensual, mientras que la época seca va de diciembre a marzo, con valores de precipitación entre 30 y 100 mm (Pabón, Eslava y Gómez, 2001, <http://www.worldclim.org/>, acceso feb 2013). El volumen de la precipitación aumenta de noreste a suroeste, siendo la zona más lluviosa el piedemonte de la cordillera Oriental, entre los 1000 y 2000 m, con precipitaciones entre 3500 y 4500 mm al año. Las zonas entre 0 y 1000 m de altitud, presentan volúmenes de precipitación anual entre 2000 y 4000 mm (Garavito-Fonseca et al., 2011).

En cuanto a la temperatura de la zona de estudio, ésta varía entre 6°C en las partes altas a más de 3500 m y 27°C a 100 m de elevación. Se reporta que la temperatura, en el cinturón altitudinal 100-500 m, se mantiene más o menos constante durante del año, presentándose un pico que alcanza 27°C entre febrero

y marzo y una disminución en junio y julio que se acerca a los 25°C (Pabón et al., 2001, Garavito-Fonseca et al., 2011). La humedad relativa varía desde 60% en la época seca hasta 90-95% en la época lluviosa. Para el departamento del Casanare, se reconocen cinco climas, de los cuales el cálido y húmedo ocupa el 95% del área de estudio y va desde los 0-1000 m. Los cuatro climas restantes son medio y muy húmedo (2000-3000 m), frío y muy húmedo (3000-4000m), muy frío y pluvial (3000-3600 m) y extremadamente frío y pluvial (>3600 m) y ocupan pequeñas porciones del departamento (Garavito-Fonseca et al., 2011).



**Figura 3: Área de estudio**

Definí unidades de análisis a partir de un modelo de cuencas (usando el módulo Hydrology de ArcMap 10). Algunas unidades de análisis debí ajustarlas corroborando el flujo de cuerpos de agua en información básica cartográfica e imágenes satelital. Cada unidad de análisis tiene el nombre del cuerpo de agua principal (río, caño o quebrada) (Figura 4). Sobre estas unidades, haré los análisis espaciales, ya que al trabajar con ecosistemas de humedales una escala de análisis integral es la cuenca hidrográfica a la que este pertenece (Quesne et al., 2010).



## Los ecosistemas de humedal en el área de estudio.

Los ecosistemas de humedal de la región de la Orinoquía se ubican principalmente en zonas planas, entre 100 y 500 m (Romero et al., 2004), que corresponde al 80% del área de estudio, mientras que la porción ocupada de la cordillera Oriental entre los 500 y los 3500 m corresponde al 20% (este estudio, a partir de un modelo de pendientes derivado de DEM 90 m, <http://srtm.csi.cgiar.org/>, acceso nov-12). Estos ecosistemas de humedales corresponden principalmente a sistemas lóticos, de origen andino y sistemas lénticos con influencia aluvial y eólica (Garavito-Fonseca et al., 2011).

Los **bosques de galería y riparios** son ecosistemas que crecen a lo largo de ríos y cañadas cuyos suelos se encuentran sometidos a inundaciones periódicas alternadas con periodos de sequía. Se caracteriza por presentar una composición florística relativamente pobre con presencia de helechos terrestres, palmas de moriche (*Mauritia flexuosa* Arecaceae) y algunos árboles dominantes (Figura 4a) (Garavito-Fonseca et al., 2011).

Las **sabanas** son ecosistemas sujetos a ciclos periódicos de inundación y desecación (Romero et al., 2004). En esta categoría se agrupan diferentes hábitos vegetales asociados (herbáceos, arbustivos y arbolados). La sabana tiene un banco o sitio alto no inundable en la época de lluvias, el bajo o parte de la sabana que se inunda en lluvias y el estero que permanece inundado aun en los meses secos (Figura 4b). Un tipo de sabana inundable, son los **morichales**, con alta densidad de palma de moriche y vegetación herbácea en el sotobosque (Figura 4c). Otra especie arbórea que forma rodales en las sabanas inundables, es el Saladillo (*Caraipa llanorum* Calophyllaceae) (Garavito-Fonseca et al., 2011).

**Las lagunas** son sistemas lénticos originados por la erosión fluvial y la dinámica hídrica propia de las sabanas inundables de la Orinoquía. Estos ecosistemas tienen espejo de agua definido y la cuenca permanece inundada durante todo el año (Figura 4d). En contraste los pantanos, tiene vegetación arbustiva o arbórea, sin espejo de agua definido. Los **ríos, quebradas, cañadas**

**o caños** son sistemas lóticos que corresponden a los grandes ríos de la región con origen andino o a cursos de agua con origen llanero, algunos de los cuales se asocian a bosques de galería (Garavito-Fonseca et al., 2011).



**Figura 4: Ecosistemas de humedales en las sabanas inundables de la Orinoquía en Colombia.**

a. Bosque de Galería, b. Sabana inundable-estero, c. Morichal, d. Laguna

*Imágenes Asociación Calidris 2013.*

### 3.2 Diseño de la investigación

#### Definición de criterios y niveles de evaluación de evaluación para las variables

Realicé una búsqueda de estudios y evaluaciones de vulnerabilidad de sitio (Quesne et al., 2010; WWF-Colombia y Fundación Natura, 2010). De esta búsqueda, seleccioné y ajusté un método de evaluación que describe la vulnerabilidad de un sistema como la interacción de su resiliencia y exposición al factor estresante, en este caso del cambio climático. Así mismo, describe la resiliencia como la relación inversa entre la capacidad adaptativa y los impactos de efectos indirectos diferentes a los que se están evaluando (Figura 5) (Comer et al., 2012).

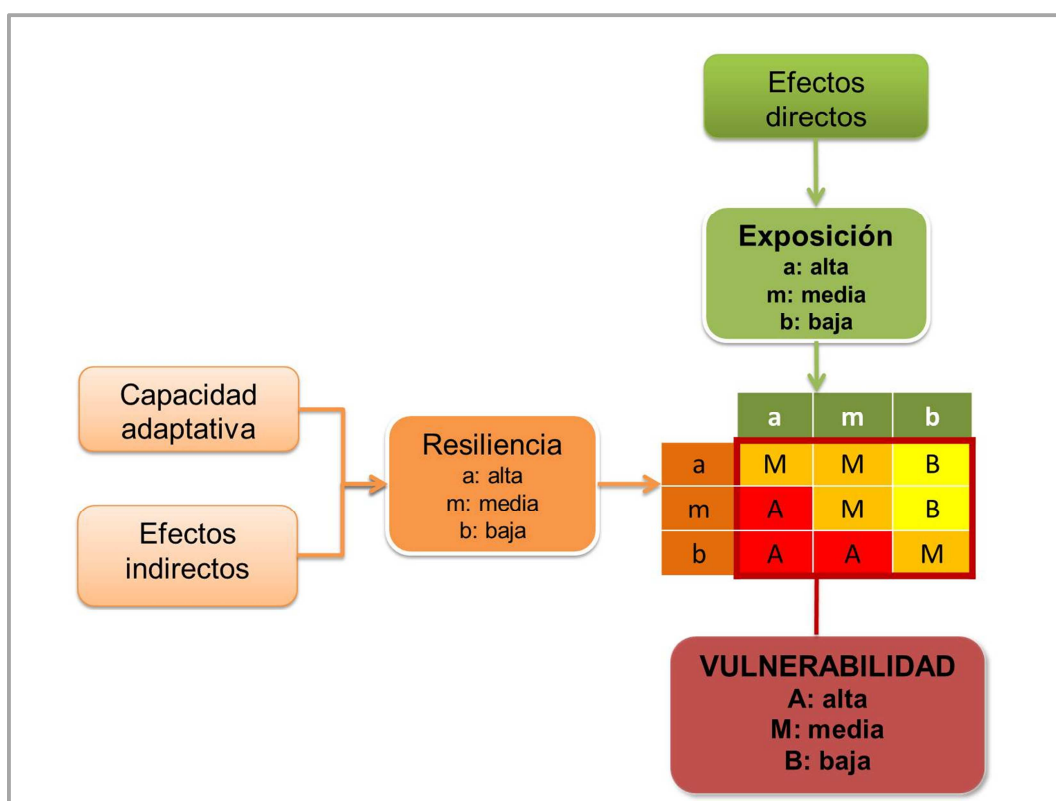


Figura 5: Diagrama de flujo para la evaluación de vulnerabilidad

Para cuantificar la exposición al cambio climático, usé las predicciones de precipitación y temperatura mensual para los periodos 2010-2039 y 2020-2049, del escenario de emisiones A2. Las predicciones de estas variables se hicieron con diferentes modelos de circulación general, por lo que debí usar valores promedio. Con esto, calculé el porcentaje de cambio mensual entre la época de referencia (1950-2000) y el periodo futuro, así como el porcentaje del área de cada unidad de análisis que se verá afectada en la ventana de tiempo futuro. La exposición fue calculada como el máximo de las variables anteriores por unidad de análisis.

Como variables para cuantificar la capacidad adaptativa, usé tipos de suelo, geomorfología, coberturas vegetales, pendiente, precipitación y temperatura. Para las tres primeras variables, calculé la cantidad de tipos de cada variable en cada una de las unidades de análisis. La hipótesis detrás de esto es que entre mayor sea la cantidad de tipos de cada una de las variables, el sistema tendrá mayor capacidad de respuesta ante los efectos directos del cambio climático y los efectos indirectos. También, usando las coberturas vegetales, calculé el porcentaje de ecosistemas de humedal en cada unidad de análisis y asigné un nivel de capacidad adaptativa mayor si el porcentaje de áreas en humedal resultó alto. Calculé rangos anuales de precipitación y de temperatura y asigné niveles altos de capacidad adaptativa si el rango fue amplio. Finalmente, obtuve la capacidad adaptativa de cada unidad de análisis calculando el promedio de los niveles de capacidad adaptativa de las variables anteriores.

De igual manera, cuantifiqué los impactos de efectos indirectos del sistema como el cambio en los hábitats naturales debidos al aumento de la infraestructura humana (obras públicas, urbanización y vías) y por cambios en los usos de suelo de la región. Para incluir en el análisis estas variables, hice zonas de buffer alrededor de zonas urbanas, carreteras, cultivos y zonas de explotación y transporte de petróleo y asigné un nivel de impacto a cada variable: 8 para impactos altos, 5 para impactos medios, 2 para impactos bajos y 0 para no impactos. Para cada variable, definí un área de buffer, que corresponde a la afectación que tiene cada variable. Para obtener los impactos indirectos, calculé

el máximo valor de impacto por celda, de las variables anteriores y para resumir por unidad de análisis, usé el cálculo del promedio de los impactos por unidad.

Para cada variable de exposición, capacidad adaptativa e impactos indirectos, definí niveles entre 0 y 10, siendo 0 la no ocurrencia de la variable, 1 el menor nivel y 10 el máximo nivel. Para variables categóricas, hice niveles de acuerdo a diferentes combinaciones y para variables continuas, utilicé rangos de valores. Para definir los rangos, tuve en cuenta estudios previos que han cuantificado la ocurrencia de la variable, el significado ecológico para los humedales o usé una escala relativa usando el rango de la variable en la zona de estudio.

### **Diseño de Sistema de Información Geográfica**

Para esta evaluación, usé los programas de GIS (ArcGIS10 y 10.1™-ESRI © y Diva-GIS 7.5) y otros programas complementarios (Map Source y Base Camp-GARMIN®) para manejar los archivos de GPS y para revisar imágenes satelitales (Google Earth). Seleccioné el sistema de coordenadas geográficas y en aquellos análisis que requería el cálculo de distancia o de áreas, el sistema UTM 18N. Todos los archivos, fueron posteriormente proyectados a un mismo sistema.

Empleé los dos modelos de datos, raster para análisis geográficos y vector para archivos con información cartográfica básicos (carreteras, poblados, ríos, entre otros). Una parte importante de información, provino de los Esquemas de Ordenamiento Territorial de los municipios del Casanare, la cual está en formato CAD que fue vectorizada y posteriormente proyectada al sistema de coordenadas elegido. Los archivos raster fueron de varios tipos: ASCII, Grid e imágenes satelitales, entre otros (ver Tabla 1). Para facilitar la combinación de las variables y poder usar los gradientes de las variables, utilicé archivos en formato raster, por lo que algunos archivos vector fueron convertidos a este formato. Definí la extensión geográfica y el tamaño de las celdas con los mismos parámetros del modelo de cuencas. En algunos casos los análisis geográficos, se hicieron sobre las celdas (estadística de celda) así como sobre las unidades de análisis (estadística zonal).

La información geográfica provino de diferentes fuentes, por lo que además revisé los metadatos y traté de usar información con metadatos completos o acompañados de un informe o memoria. Sin embargo, algunas coberturas no cuentan con información completa y tampoco pude rastrear su origen (ver Tabla 1). Finalmente, para la información producida en este estudio, elaboré los metadatos correspondientes e hice una memoria del proceso de elaboración, teniendo en cuenta herramientas de análisis usadas, sistemas de referencia, calidad de la información, entre otras cosas.

### **Evaluación de vulnerabilidad de unidades de análisis y sitios importantes**

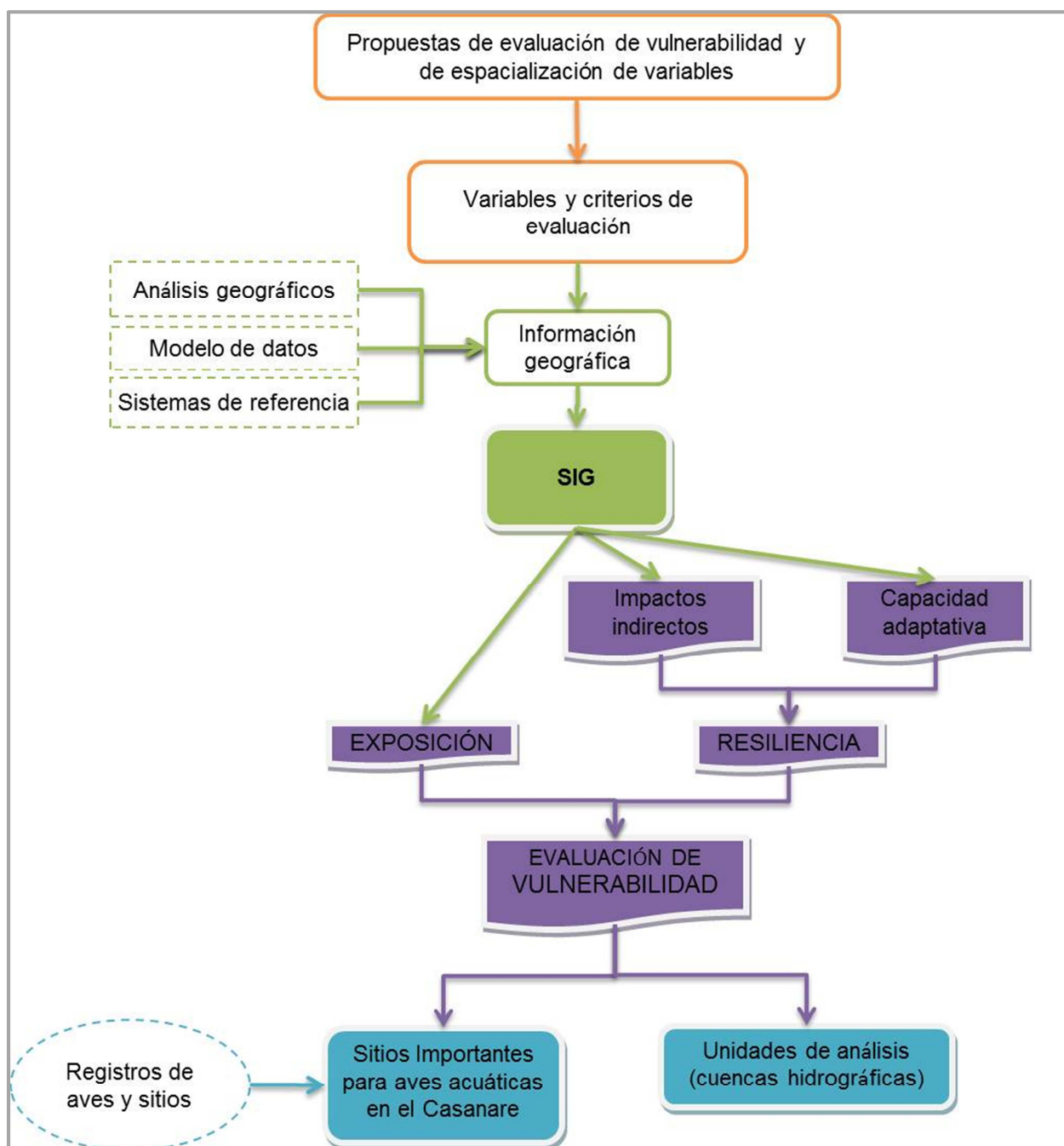
Una vez que cada una de las variables de los tres componentes de evaluación de la vulnerabilidad estuvieron listos, hice una matriz con las posibles combinaciones entre los criterios. Primero uní la información que corresponde a los criterios capacidad adaptativa e impactos por efectos indirectos para obtener la resiliencia de las unidades de análisis. Para esta combinación tuve en cuenta que a mayor capacidad adaptativa, mayor es la resiliencia y que a mayores impactos de efectos indirectos, menor es la resiliencia y viceversa. De la misma manera, junte la resiliencia y la sensibilidad de cada unidad de análisis, para obtener el grado de vulnerabilidad del sistema. En el caso de la vulnerabilidad, ésta se hace mayor si la sensibilidad es alta y es menor, cuando la resiliencia es alta.

### **Definición de sitios importantes para aves acuáticas**

Para definir los sitios importantes, usé registros de aves acuáticas en las sabanas inundables de la Orinoquía en Colombia. Estos registros hacen parte del proyecto **Sitios importantes para la conservación de las aves acuáticas en el Meta y Casanare**, que actualmente lleva a cabo la Asociación Calidris (Eusse-González, Ruiz-Guerra y Arango, datos sin publicar). Estos datos corresponden a jornadas de campo realizadas entre 2012 y 2013, donde se hicieron recorridos terrestres y aéreos, registrando todas las aves acuáticas vistas o escuchadas. Cada registro tiene asociada las coordenadas geográficas del sitio de

observación, tomadas con un GPS Oregon 450 (Garmin ®) y otra información de interés para la caracterización de los sitios como tipo de hábitat, actividad de las aves.

Con esta información sistematizada en una hoja de cálculo, hice un archivo geográfico con la localidad correspondiente al registro, las coordenadas geográficas y la abundancia por especie. A partir de esta información, junté las localidades cercanas y sumé la abundancia de individuos y la riqueza de especies, en una cuadrícula de 5 km de lado, con el software Diva-GIS ([www.diva-gis.org](http://www.diva-gis.org)). Posteriormente busqué cuáles sitios correspondieron a las celdas de mayor abundancia y riqueza de especies (más de 500 individuos de todas las aves acuáticas y más de 15 especies). Finalmente envíe la lista a algunos expertos en la zona y en aves acuáticas, quienes aportaron a la selección de sitios con diferente grado de importancia para las aves acuáticas de la región. Una vez hechas las combinaciones y calculada la vulnerabilidad de cada unidad de análisis, sobrepuse los sitios importantes definidos anteriormente y evalué los tres componentes de la vulnerabilidad para cada sitio.



**Figura 6: Diagrama de flujo que muestra los pasos seguidos para realizar la evaluación.**

Los colores indican las diferentes etapas descritas anteriormente. Los cuadros de color sólido, muestran los principales productos de este estudio



**Tabla1: Fuentes y recolección de datos.**

**Variables** usadas en la evaluación de los componentes de la vulnerabilidad, **Cobertura geográfica** de las variables, **Fuente** de la información, **Calidad de la Información** evaluada para las necesidades de esta investigación.

| Variable  | Cobertura geográfica   | Fuente   | Calidad de la información  | Modelo de datos |
|---|--|--|--|-----------------|
| <b>Capacidad adaptativa</b>                             |  |  |  |                 |
| Pendientes  | Modelo de pendientes   | -DEM de 90m ( <a href="http://srtm.csi.cgiar.org/">http://srtm.csi.cgiar.org/</a> , acceso nov-12)   | Buena<br>La información provino de dos fuentes y tenía modelos de datos diferentes (CAD y Raster)                                | Vector          |
| Tipos de coberturas<br>Porcentaje de áreas de humedales | Ecosistemas del Orinoco<br>1:100.000                                 | -Romero M., Galindo G., Otero J. y Armenteras D. 2004. Mapa de ecosistemas de Orinoquía. IAvH. 1:100.000   | Buena  | Vector          |
| Tipos de suelos   | Suelos<br>Ecosistemas del Orinoco<br>1:100.000                       | -EOT de municipios del Casanare 1:25.000 (Gobernación del Casanare)<br>-Romero M., Galindo G., Otero J. y Armenteras D. 2004. Mapa de ecosistemas de Orinoquía. IAvH 1:100.000 | Buena<br>La información originalmente está en un modelo de datos CAD, lo cual dificulta su uso.                                  | Vector          |
| Tipos de Geomorfología                                  | Geomorfología  | -EOT de municipios del Casanare (Gobernación del Casanare)<br>-Romero M., Galindo G., Otero J. y Armenteras D. 2004. Mapa de ecosistemas de Orinoquía. IAvH 1:100.000          | Buena<br>La información originalmente está en un modelo de datos CAD, lo cual dificulta su uso.                                  |                 |
| Amplitud de nicho climático                             | Promedio de temperatura mensual<br>Promedio de precipitación mensual | Worldclim ( <a href="http://www.worldclim.org/">http://www.worldclim.org/</a> acceso nov-2012)   | Buena  | Raster (ASCII)  |
| <b>Impactos de efectos indirectos</b>                   |  |  |  |                 |
|   | Centros urbanos  | IGAC 2007  | Buena.<br>El tamaño del polígono que corresponde al poblado, puede estar desactualizado. Poblados pequeños o dispersos no fueron | Vector          |

| Variable                                       | Cobertura geográfica   | Fuente  | Calidad de la información  | Modelo de datos |
|--|--|---|--|-----------------|
|  |  |   | tenidos en cuenta  |                 |
|  | Carreteras   | IGAC ( <a href="http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/">http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/</a> , acceso nov-2012)   | Buena  | Vector          |
|  | Cultivos   | -Romero M., Galindo G., Otero J. y Armenteras D. 2004. Mapa de ecosistemas de Orinoquía. IAvH. 1:100 mil<br>-Fedearroz 2011<br>-Geovisor de Cenipalma-Cenispace   | Medio<br>La información del mapa de ecosistemas es de 2004, por lo que esta desactualizada. La información secundaria con la que actualicé el mapa de ecosistemas, debí digitalizarla a partir de mapas publicados, por lo que los errores en este proceso pueden ser altos. | Vector          |
|  | Explotación de petróleo  | -Mapa de Tierras (ANH, 2013. <a href="http://www.anh.gov.co/es/index.php?id=1">http://www.anh.gov.co/es/index.php?id=1</a> , acceso febrero 2012)<br>- Red de distribución y refinamiento 2006<br><a href="http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/default.aspx">http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/default.aspx</a> , acceso febrero 2012 | Buena  |                 |
| <b>Exposición</b>                              |  |   |  |                 |
| Magnitud de cambio de las variables climáticas | -Promedio mensual de las predicciones de temperatura y precipitación 2010-2039 y 2020-2049 | -Periodo 2010-2039 y 2020-2049<br><a href="http://www.ccafs-climate.org/">http://www.ccafs-climate.org/</a>   | Buena  | Raster          |
| Área de cambio                                 | -Temperatura y precipitación de referencia 1950-2000                                       | -Periodo 1950-2000<br>Worldclim <a href="http://www.worldclim.org/">http://www.worldclim.org/</a>   |  |                 |

## 4 ANÁLISIS DE DATOS

### 4.1 Exposición a efectos directos del cambio climático

Como variables para cuantificar la exposición de los sitios al cambio climático, empleé valores de precipitación y temperatura mensual para el periodo 1950-2000 (periodo de referencia) y valores promedio de precipitación y temperatura mensual para los periodos 2010-2039 y 2020-2049 (periodos de predicción) para el escenario de emisiones A2. La información proyectada al futuro de las variables climáticas se obtuvo con el método Delta de Downscaling (Ramírez y Jarvis, 2010).

Para resumir todos los modelos de circulación general utilicé estadísticas de celda calculando para cada variable el promedio por mes por celda del cambio en la temperatura y en la precipitación. Con la herramienta *Modeler builder* hice todos los cálculos siguientes para reducir los errores debidos al gran volumen de información y a la cantidad de procesos. Posteriormente extraje el área de estudio mediante una máscara y remuestreé los rasters, para conservar el mismo tamaño de celda.

#### 4.1.1 Cálculo del porcentaje de cambio entre el futuro y el presente.

Calcule la razón de cambio de la precipitación y la temperatura entre el presente y el futuro usando la calculadora de rasters. Para esto dividí los valores predichos entre los valores del presente. Para evaluar esta razón usé la Tabla 2 y asigné el nivel de exposición correspondiente. Esta tabla reporta el resultado de la razón de cambio entre los valores predichos y los de referencia y el porcentaje de cambio correspondiente. Como la temperatura y precipitación fueron calculados por meses, calculé el promedio de los niveles de sensibilidad de estos rasters para incluirlos en el análisis como un solo valor.

**Tabla 2: Niveles de exposición para el porcentaje de cambio de la precipitación y la temperatura entre los periodos futuros y presente**

Aumento y Diminución de la Variable: resultado de la razón entre el futuro y el presente, % de cambio: correspondiente al cambio anterior.

| Nivel de exposición | Aumento de variable en el futuro (razón > 1) | Disminución de variable en el futuro (razón < 1) | % de cambio |
|---------------------|--|--|-------------|
| 1                   | 1  | 1  | Igual       |
| 2                   | 1,02   | 0,98   | 2           |
| 3                   | 1,03   | 0,97   | 3           |
| 4                   | 1,05   | 0,95   | 5           |
| 5                   | 1,7  | 0,93   | 7           |
| 6                   | 1,1  | 0,90   | 10          |
| 7                   | 1,15   | 0,85   | 15          |
| 8                   | 1,2  | 0,80   | 20          |
| 9                   | >1,25  | <0,75  | >25         |

#### 4.1.2 Porcentaje de área de cambio entre el futuro y el presente.

Con los resultados del proceso anterior, calculé el porcentaje de área que cambia en las predicciones del futuro. Para esto combiné cada variable mensual con las unidades de análisis y posteriormente calculé el porcentaje del área transformada como el número de celdas con niveles de exposición diferente de 1. Finalmente asigné niveles de exposición de acuerdo a la Tabla 3.

**Tabla 3: Niveles de exposición para el porcentaje de área de cambio por meses, entre el futuro y el presente.**

| Nivel de exposición | Características   |
|---------------------|---|
| 10                  | Todos los meses con más del 80% de área cambiada<br>Más de 8 meses con el 100% del área cambiada  |
| 9                   | Todos los meses con más del 60-80 % de área cambiada<br>6-7 meses con el 100% del área cambiada   |
| 8                   | Todos los meses con el 50-60% de área cambiada<br>5-6 meses con el 100% del área cambiada<br>Más de 6 meses con más del 80% de área cambiada  |
| 7                   | Todos los meses con 40-50% de área cambiada<br>3-4 meses con el 100% del área cambiada<br>5-6 meses con más del 80% de área cambiada  |
| 5                   | Todos los meses con del 30-40% de área cambiada<br>2 meses con el 100% del área cambiada<br>3-4 meses con más del 80% de área cambiada<br>5-6 meses con más del 60% del área cambiada |

| Nivel de exposición | Características  |
|---------------------|--|
| 4                   | Todos los meses con menos del 30% de área cambiada<br>2 meses con más del 80% de área cambiada<br>4 meses con más del 60% del área cambiada<br>Más de 6 meses con el 30-40% de área cambiada |
| 3                   | 1 meses con más del 80% de área cambiada<br>2-3 meses con más del 60% del área cambiada<br>4-5 meses con el 30-40% de área cambiada<br>Más de seis meses con el 20% del área cambiada        |
| 2                   | 3 meses con el 30-40% de área cambiada<br>4-5 meses con el 20% del área cambiada<br>1 mes con más del 60%  |
| 1                   | 2 meses con el 30-40% de área cambiada<br>3 meses con el 20% del área cambiada<br>Más de 6 meses con más de 10-20% de cambio   |

## 4.2 Capacidad adaptativa de los ecosistemas ante el cambio climático

### 4.2.1 Pendiente

Con el Modelo de Elevación Digital, construí un modelo de pendientes (Figura 7) y luego hice una reclasificación de acuerdo a la Tabla 4. Para la reclasificación de pendientes, tuve en cuenta que los sitios que estoy evaluando corresponden a humedales, cuya mayor frecuencia se da en zonas planas donde la escorrentía del agua es menor. Una vez hecha la reclasificación de las pendientes empleé estadística zonal y hallé el valor más frecuente en cada unidad de análisis (estadístico *majority*).

Tabla 4: Niveles de Capacidad adaptativa de pendientes

| Nivel de Capacidad adaptativa | Pendiente (°) |
|-------------------------------|---------------|
| 9                             | 0-1           |
| 8                             | 1-2           |
| 7                             | 2-3           |
| 6                             | 3-5           |
| 5                             | 5-10          |
| 4                             | 10-15         |
| 3                             | 15-20         |
| 2                             | 20-25         |
| 1                             | >25           |

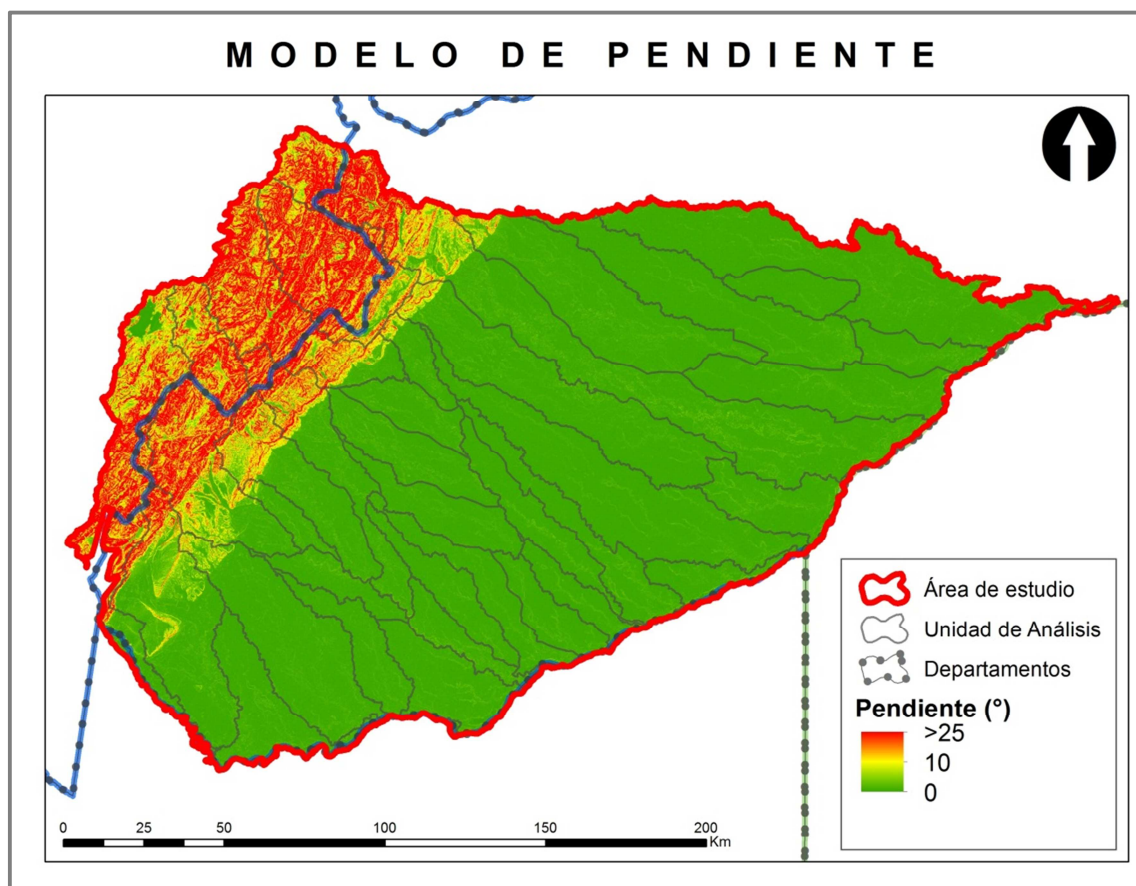
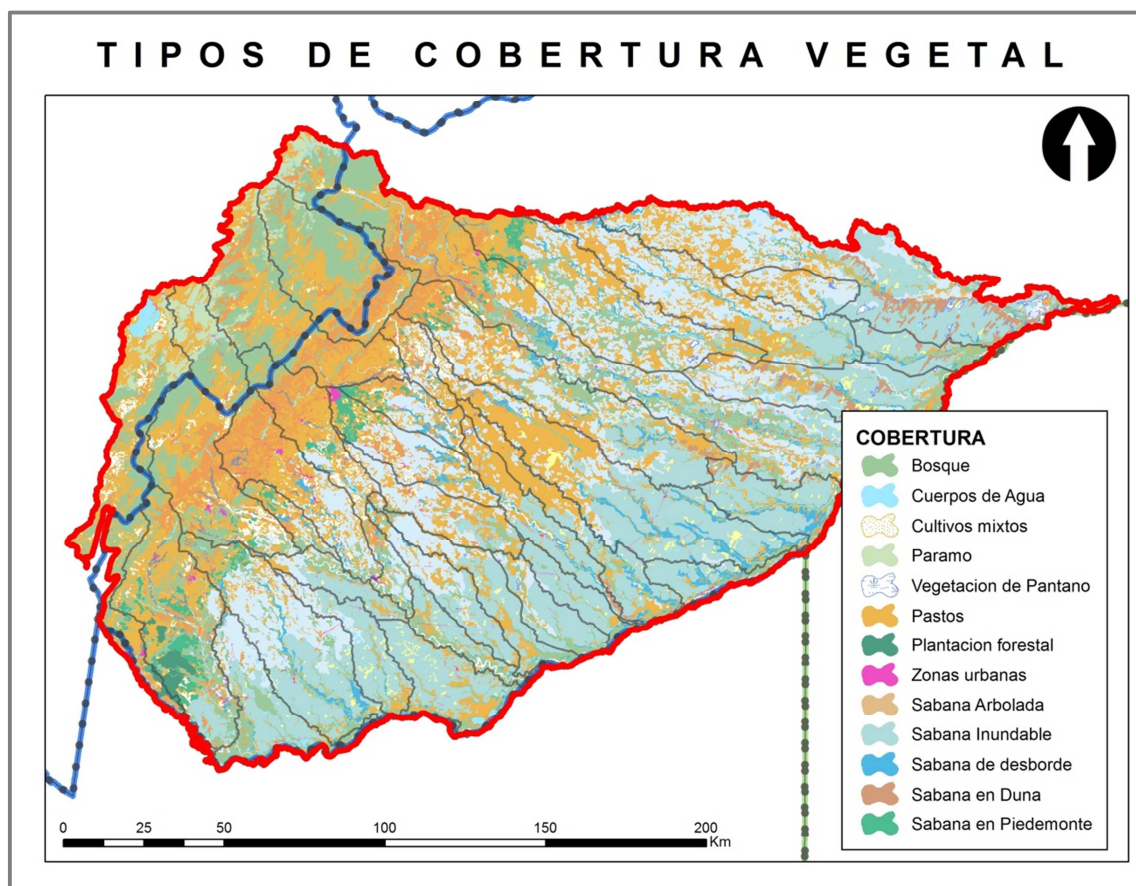


Figura 7: Modelo de pendientes del área de estudio

#### 4.2.2 Cantidad de tipos de coberturas vegetales

Uní la información de ecosistemas de la Orinoquía colombiana (Romero et al. 2004), con las unidades de análisis (Figura 8). En la tabla de atributos calculé la cantidad de coberturas vegetales por cada unidad de análisis. En total encontré 14 tipos diferentes de coberturas vegetales (máximo número de coberturas), con las que elaboré la tabla de niveles de capacidad adaptativa (Tabla 5).



**Figura 8: Tipos de coberturas vegetales del área de estudio**

**Tabla 5: Niveles de capacidad adaptativa relacionados con el número de tipos de cobertura del suelo por unidad de análisis.**

| Nivel capacidad adaptativa | Cantidad de tipos coberturas del suelo |
|----------------------------|--|
| 10                         | 14                                     |
| 9                          | 12-13                                  |
| 8                          | 11                                     |
| 7                          | 10-9                                   |
| 6                          | 8                                      |
| 5                          | 7                                      |
| 4                          | 6-5                                    |
| 3                          | 4                                      |
| 2                          | 3                                      |
| 1                          | 1-2                                    |

#### **4.2.3 Área de humedales**

Con la intersección del mapa de ecosistemas de la Orinoquía (Romero et al. 2004) y las unidades de estudio, calculé el área en hectáreas de cada cobertura vegetal en cada unidad de análisis. Separé los ecosistemas de humedales de esta cobertura y calculé el porcentaje de estos ecosistemas en cada unidad de análisis. Consideré como humedales los cuerpos de agua, sabanas de desborde, sabanas inundables, sabanas estacionalmente inundadas y bosques inundables. El nivel de capacidad adaptativa fue igual al porcentaje de área de humedales en cada unidad, dividido por 10 (10% de área correspondió a una capacidad adaptativa de 1 y el 100% de área, a un nivel de capacidad adaptativa de 10).

#### **4.2.4 Cantidad de tipos de suelos**

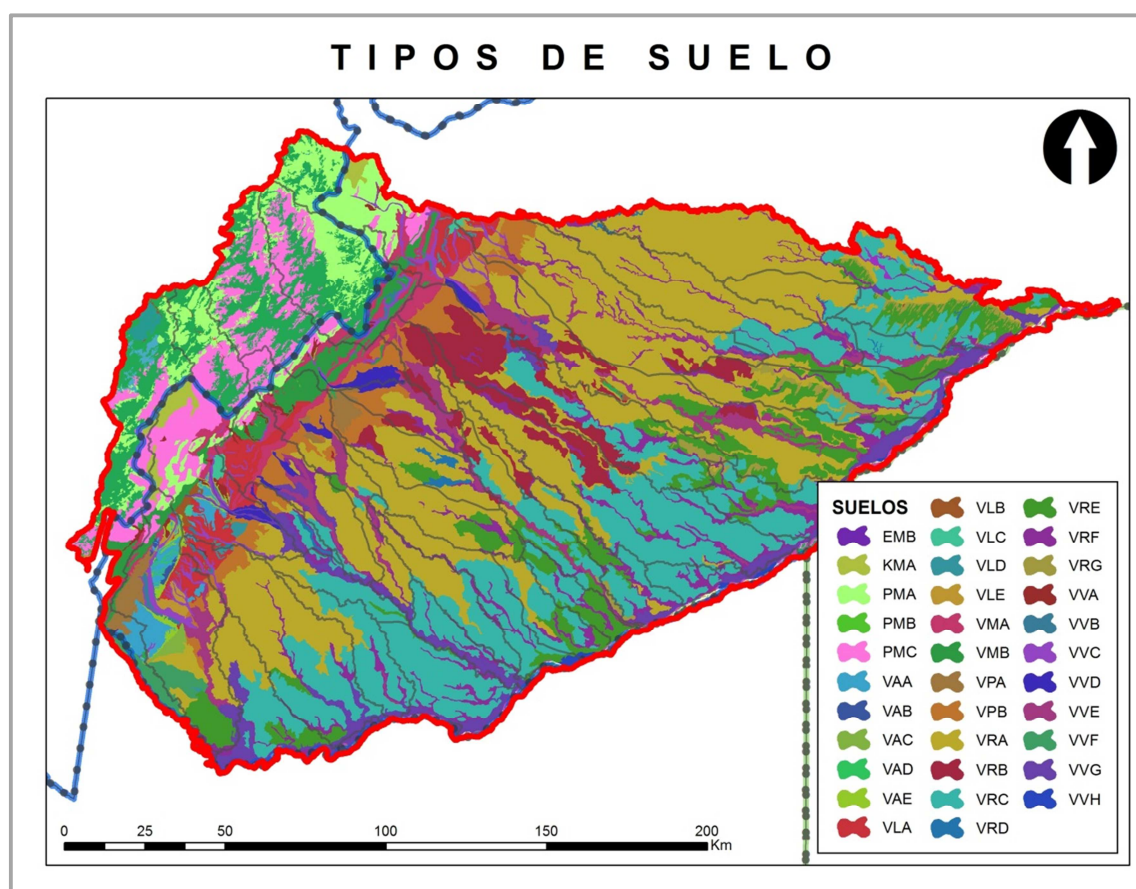
A partir de los EOT de municipios del Casanare (Gobernación del Casanare) y el mapa de ecosistemas de la Orinoquía (Romero et al. 2004), utilicé el atributo de suelos y calculé cuántos tipos de suelos ocurrían en el área de estudio, el cual correspondió al máximo nivel de capacidad adaptativa (Tabla 6). La escala de las dos coberturas es diferente y además la zona de montaña que corresponde al departamento de Boyacá es diferente al resto de la información (Figura 9, Anexo



1). Luego intersecté esta cobertura con las unidades de análisis y seguí el mismo procedimiento explicado para los tipos de coberturas vegetales. En total encontré 34 tipos diferentes de suelos.

**Tabla 6: Niveles de capacidad adaptativa relacionados al número de tipos de suelos**

| Nivel capacidad adaptativa | Cantidad de tipos de suelos |
|----------------------------|-----------------------------|
| 10                         | 34                          |
| 9                          | 30-33                       |
| 8                          | 26-29                       |
| 7                          | 22-25                       |
| 6                          | 19-21                       |
| 5                          | 15-18                       |
| 4                          | 11-14                       |
| 3                          | 7-10                        |
| 2                          | 3-6                         |
| 1                          | 1-2                         |



#### 4.2.5 Amplitud de nicho climático

Esta variable hace referencia a las diferencias en precipitación y temperatura a la que están expuestas las unidades de análisis durante el año y que tan diferentes son estas condiciones. Consideré que entre más amplio es el nicho climático de un sitio, es de esperarse que el sistema pueda enfrentar mejor el cambio climático. Para esta variable, consulté los datos de WorldClim (<http://www.worldclim.org/> acceso noviembre 2012) que tiene información de temperatura, precipitación y 19 variables bioclimáticas. Empleé la información de 30 arco-segundos para la región de estudio en formato ASCII.

Para definir el rango climático, calculé el rango de temperatura y precipitación usando las variables bioclimáticas 16 (Precipitación del cuatrimestre con más agua) y 17 (Precipitación del cuatrimestre más seco) para precipitación y 10 (Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido) y 11 (Temperatura promedio del cuatrimestre más frío) para temperatura. Estas variables reportan valores extremos de temperatura y precipitación en periodos de cuatro meses y no solo por un mes. Como la elevación puede influenciar la temperatura, corté las unidades de análisis en cinturones altitudinales de 0 a 500 m, de 500 a 1000 m, de 1000 a 2000 m y más de 2000 m.

Mediante la herramienta de estadística zonal, agrupé las celdas de cada variable climática en cada unidad de análisis y luego les asigné los niveles de capacidad adaptativa con la Tabla 7. En los casos en que la unidad quedó dividida por los cinturones altitudinales, escogí el nivel de capacidad adaptativa más frecuente en cada unidad de análisis y lo asigne a toda la unidad.

**Tabla 7: Nivel de capacidad adaptativa del rango de temperatura y precipitación anual**

| Nivel de Capacidad adaptativa | Rango de temperatura (°C) | Rango de precipitación (mm) |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1                             | >1                        | >800                        |
| 2                             | 1-2                       | 800-900                     |
| 3                             | 2-3                       | 900-1100                    |
| 4                             | 3-4                       | 1100-1250                   |

| Nivel de Capacidad adaptativa | Rango de temperatura (°C) | Rango de precipitación (mm) |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 5                             | 4-5                       | 1250-1400                   |
| 6                             | 5-7                       | 1400-1500                   |
| 7                             | 7-9                       | 1500-1650                   |
| 8                             | 9-12                      | 1650-1800                   |
| 9                             | 12-15                     | 1800-2000                   |
| 10                            | >15                       | >2000                       |

### 4.3 Impactos por efectos indirectos del cambio climático

Esta variable muestra en qué magnitud los sitios pueden ser afectados por efectos combinados diferentes a cambio climático. Los efectos indirectos seleccionados fueron el aumento de infraestructura humana (vías y centros poblados), la expansión de frontera agrícola (cultivos de palma aceitera, arroz, y cultivos mixtos) y la explotación minera (zonas de explotación y ductos de distribución de petróleo). En cada caso, solo tuve en cuenta impactos locales y no regionales. Es decir, cuantifiqué los impactos cercanos a la carretera o al sitio de explotación minera pero no los impactos ocurridos por desviación de cauces de ríos o contaminación atmosférica o de acuíferos.

#### 4.3.1 Carreteras

Usé la información de vías de la cartografía oficial de Colombia (IGAC, <http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/>, acceso dic-2012) e hice zonas de buffer alrededor de las vías, que representan zonas de afectación de ambientes naturales. La distancia de los buffer, fue diferente para las carreteras pavimentadas, las no pavimentadas y los caminos. Posteriormente, asigné un nivel de impacto a cada tipo de carretera, como se muestra en la Tabla 8, como un intento de cuantificar el impacto de cada tipo de carretera sobre los hábitats naturales, por flujo de vehículos, movimiento de material para construcción o contaminación cercana a las carreteras. Es de anotar, que para la construcción de las carreteras en las sabanas es necesario hacerlo sobre terraplenes de material extraído junto a las mismas. En época lluviosa, los sitios de extracción de material, que se conocen

comúnmente como áreas de préstamo, se llenan de agua convirtiéndose en refugio de fauna acuática (Laura Miranda, com pers.).

**Tabla 8: Nivel de impacto y distancia de afectación de carreteras**

| Nivel de Impacto | Carreteras                    | Distancia de afectación (m) |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 3                | Carreteable                   | 50                          |
| 7                | Sin Pavimentar y vías férreas | 200                         |
| 7                | Pavimentada                   | 200                         |

Una vez tuve la información de cada tipo de vía, con su distancia de afectación y nivel de impacto, hice mapas booleanos (NoData= 0) y combiné los raster con estadística de celda, escogiendo el máximo valor de impacto para cada celda.

#### 4.3.2 Centros Urbanos

Usé información de poblados y cabeceras municipales de cada municipio (IGAC, 2008), polígonos del mapa de Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (IDEAM et al. 2007) que corresponden a la leyenda de centros urbanos y asigné el nombre del municipio a estos polígonos empleando estadísticas demográficas de proyección poblacional ([http://www.dane.gov.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=238&Itemid=121](http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=238&Itemid=121), acceso mayo de 2012). Asigné a los polígonos de las cabeceras municipales el número de habitantes proyectado para 2013 y a los demás polígonos que corresponden a poblados rurales, la población proyectada para la zona rural de cada municipio. En este caso estoy asumiendo que la población rural está concentrada en los poblados, lo cual no es preciso para departamentos como el Casanare, donde la población rural representa una proporción mayor que la urbana (Censo General de población 2005, DANE).

De acuerdo al tamaño poblacional, hice buffers alrededor de estos polígonos, asumiendo que mayor cantidad de población impacta más superficie alrededor de los poblados, además que usan más área dedicada a facilidades como depósitos de basura, carreteras, cultivos, entre otros. Apliqué como distancia de los buffer

los valores indicados en la Tabla 9 y asumí que el impacto de un centro poblado va de medio a alto.

**Tabla 9: Nivel de impacto y distancia de afectación de centros urbanos**

| Nivel de Impacto | Número de habitantes | Distancia de afectación (m) |
|------------------|----------------------|-----------------------------|
| 10               | >100.000             | 2500                        |
| 9                | 100.000-80.000       | 2000                        |
| 9                | 80.000-50.000        | 2000                        |
| 8                | 50.000-30.000        | 1500                        |
| 8                | 30.000-20.000        | 1500                        |
| 7                | 20.000-10.000        | 1000                        |
| 7                | 10.000-5.000         | 1000                        |
| 6                | 5.000-1.000          | 500                         |
| 6                | <1.000               | 500                         |

#### 4.3.3 Cultivos

Usé información de cultivos de palma, arroz y cultivos mixtos proveniente del mapa de ecosistemas del Orinoco (Romero et al. 2004) y el de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (IDEAM et al. 2007), actualizada con información publicada recientemente de áreas cultivadas entre 2010 y 2011 (Fedearroz 2012; Geovisor Ceninspace- áreas cultivadas de Palma <http://ceninspace.cenipalma.org/>, acceso marzo de 2012). Una vez que hube digitalizado y articulado toda la información, establecí zonas de buffer para cada cultivo y asigné un nivel de impacto como los indica la Tabla 10.

El impacto asignado a los cultivos de palma fue máximo, ya que estos cultivos cambian totalmente el paisaje de sabana estructura vegetal de un solo estrato) a uno de mayor complejidad. Por su parte, al cultivo de arroz le asigné un impacto medio, ya que aunque los arrozales ocupan grandes extensiones de sabanas inundadas y cambian su dinámica hídrica, pueden funcionar como hábitats sustituto para la fauna acuática (Johnston-González et al. 2010).

**Tabla 10: Nivel de impacto y distancia de afectación de cultivos**

| Nivel de Impacto | Cultivos        | Distancia de afectación (m) |
|------------------|-----------------|-----------------------------|
| 8                | Palma           | 500                         |
| 5                | Arroz           | 500                         |
| 5                | Cultivos mixtos | 200                         |

#### 4.3.4 Minería- Petróleo:

Empleé la información de tierras de la Agencia Nacional de Hidrocarburos de Colombia, que está disponible en la página web de esta institución en formatos geográficos (<http://www.anh.gov.co/es/index.php?id=1>, acceso febrero 2012). Esta información corresponde a las áreas en producción, evaluación, reservadas y por adjudicar. En este caso solo usé las áreas en explotación. Por otro lado, obtuve del servicio de SIG Nacional, información sobre ductos de transporte de petróleo y gas (<http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/default.aspx>, Red de distribución y refinamiento 2006, acceso febrero 2012).

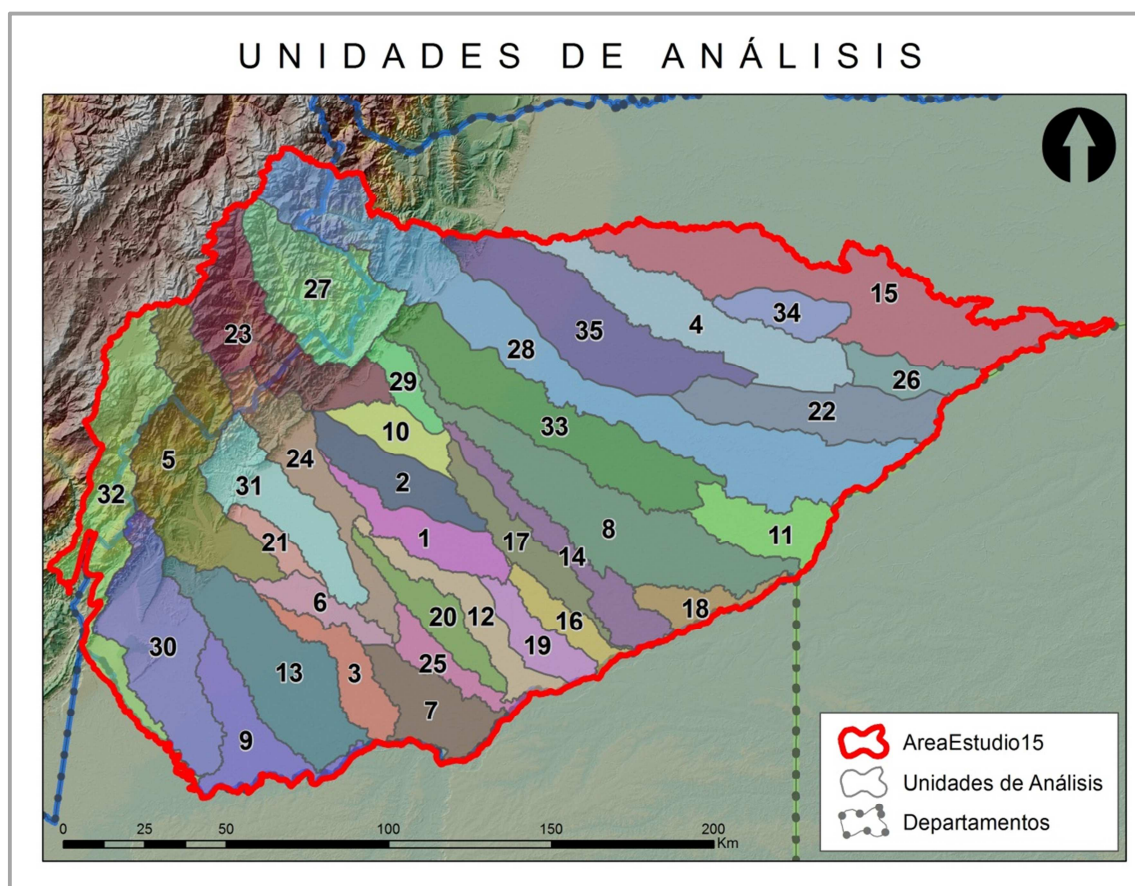
Para asignar el nivel de impacto para la explotación de petróleo, establecí un área de amortiguamiento de 150m a cada lado de los ductos y uní esto con las tierras en producción. Asigné a estos polígonos un nivel de impacto medio, ya que los sistemas de conducción y las áreas de explotación cambian la estructura del paisaje a su alrededor, pero la afectación en estos casos la definí como local.



## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Delimitación de unidades de análisis

Obtuve 35 unidades de análisis, a partir de las cuencas delimitadas (Figura 10). Las unidades de análisis tienen áreas diferentes y están ubicadas en varios rangos altitudinales. Dos unidades de análisis, las que corresponden a la cuenca del río Tua y el río Upia cubren toda la cuenca de los ríos, desde el nacimiento en la cordillera Oriental, hasta su desembocadura en el río Meta. De las 35 unidades, 20 están entre el río Meta y 200 m de altitud; 6 unidades van hasta los 500 m, aunque 3 de estas vierten sus aguas en un cauce diferente al río Meta; 2 van desde los 200 m hasta los 1000 m, 2 más hasta los 2000 m y 5 unidades entre 500 m y 3500 m. El área de las unidades de análisis van desde más de 366.000 hasta 21.500 ha (Tabla 11).



**Figura 10: Unidades de Análisis usadas en este estudio. Las unidades corresponden a cuencas de ríos y quebradas**

**Tabla 11: Unidades de Análisis, área y rango de elevación**

\*unidades con sitios importantes

| ID Mapa | Nombre                  | Área (ha) | Elevación (m) |
|---------|-------------------------|-----------|---------------|
| 1       | Caño Canacabare*        | 62 122    | 160-260       |
| 2       | Caño Agua Verde         | 69 122    | 165-620       |
| 3       | Caño Bujumena*          | 53 603    | 150-205       |
| 4       | Caño Chiquito*          | 146 919   | 120-240       |
| 5       | Caño Chitamena          | 178 085   | 195-3715      |
| 6       | Caño Dumagua norte      | 35 795    | 170-225       |
| 7       | Caño Dumagua sur        | 76 254    | 140-175       |
| 8       | Caño Duya*              | 200 434   | 120-250       |
| 9       | Caño El Boral*          | 81 011    | 155-215       |
| 10      | Caño El Tiestal         | 41 946    | 180-330       |
| 11      | Caño Guanapalo bajo     | 64 701    | 120-140       |
| 12      | Caño Guarimena          | 62 189    | 140-205       |
| 13      | Caño Guira              | 153 889   | 150-170       |
| 14      | Caño Guirripa           | 73 352    | 133-195       |
| 15      | Caño La Hermosa         | 251 325   | 100-200       |
| 16      | Caño Maremare           | 35 178    | 135-160       |
| 17      | Caño Ocumare            | 59 836    | 135-190       |
| 18      | Caño Orocue             | 34 318    | 130-145       |
| 19      | Caño Surimena           | 43 805    | 130-160       |
| 20      | Caño Tejemena           | 51 261    | 140-205       |
| 21      | Caño Tinije             | 21 480    | 165-230       |
| 22      | Caño Yatea*             | 110 713   | 100-150       |
| 23      | Quebrada La Niata       | 141 615   | 205-3560-     |
| 24      | Río Charte              | 9 668     | 160-2360      |
| 25      | Río Cusiana bajo        | 35 926    | 130-175       |
| 26      | Río Guachiria           | 40 068    | 100-130       |
| 27      | Caño 2                  | 138 682   | 640-3750      |
| 28      | Río Pauto               | 366 215   | 100-3750      |
| 29      | Río Tocaria             | 28 122    | 190-540       |
| 30      | Río Tua*                | 152 485   | 170-2150      |
| 31      | Río Unete*              | 98 241    | 180-840       |
| 32      | Río Upia                | 160 037   | 160-3780      |
| 33      | Caño Guanapalo Alto     | 177 184   | 140-750       |
| 34      | Caño La Mula-El Venado* | 40 686    | 120-150       |
| 35      | Río Guachiria alto      | 166 934   | 150-1270      |

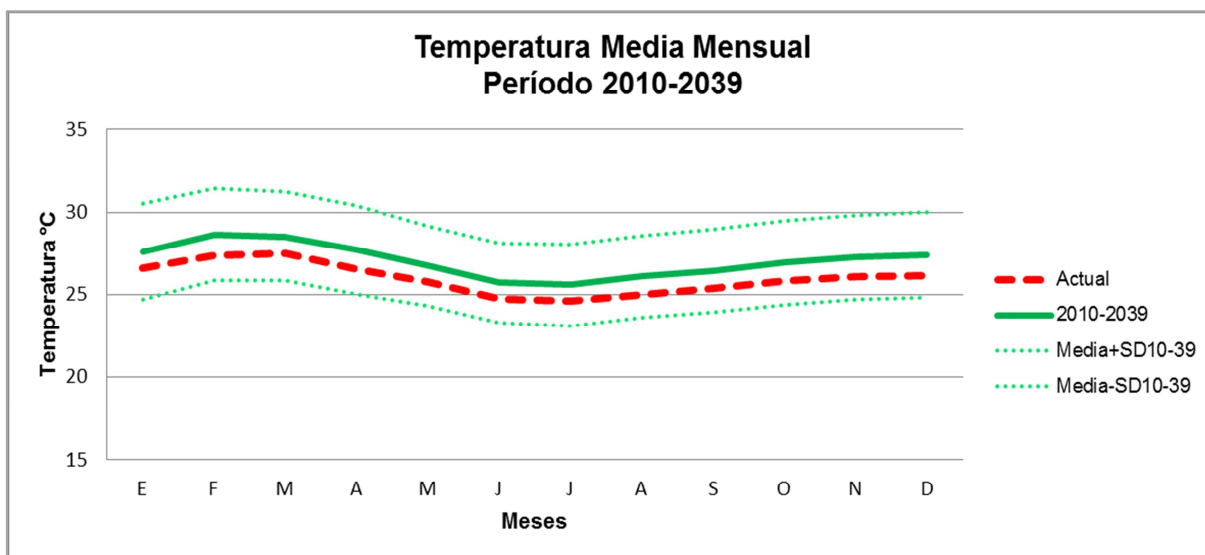


## 5.2 Exposición a cambios de precipitación y temperatura

### 5.2.1 Período 2010-2039

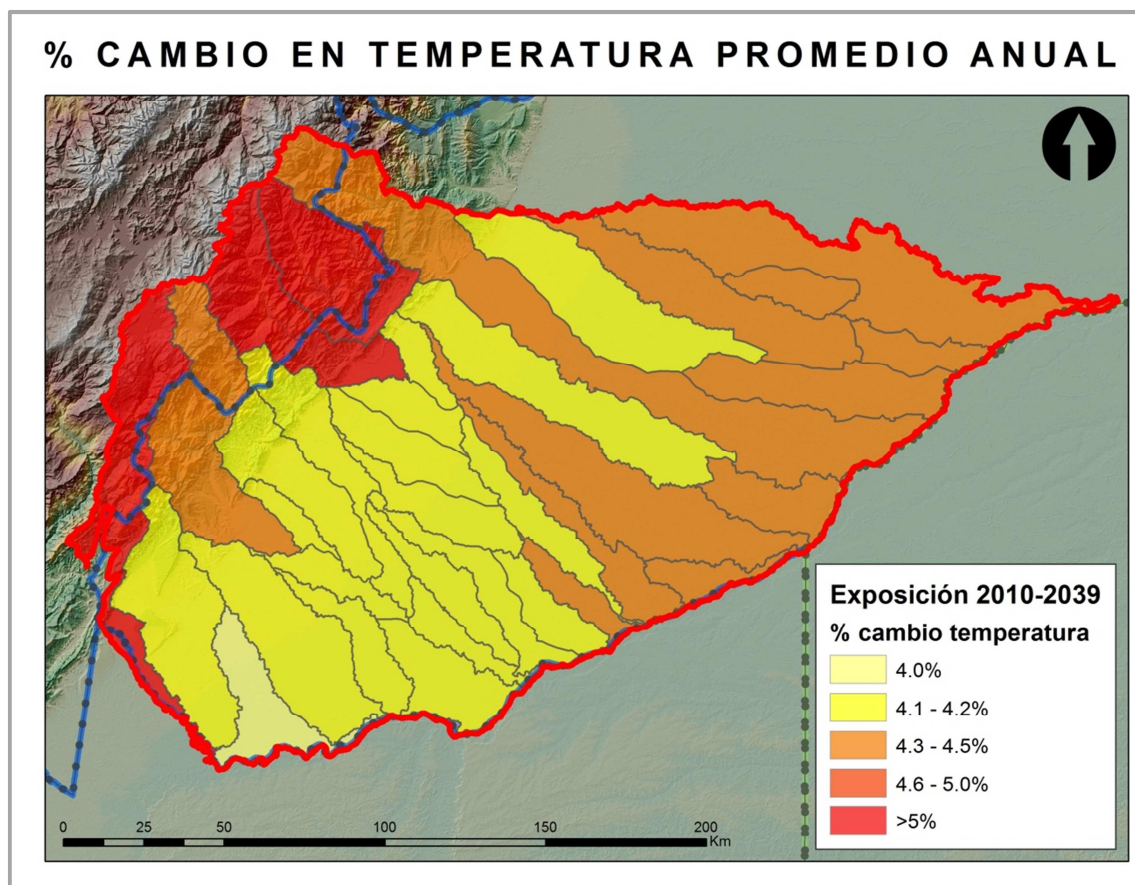
#### Cambio en la temperatura

Para el periodo 2010-2039 encontré que la temperatura en el área de estudio aumentará en promedio 4.1% ( $\pm 0.33$ ), siendo el mes de diciembre, con 4.6%, el que presentará mayor variación y el mes julio, con 3.7%, el de menor variación. Como se ve en la Figura 11, el comportamiento de la temperatura en el futuro tendrá el mismo patrón durante el año, respecto a la temperatura de referencia, con una temporada de temperaturas altas entre septiembre-abril, con un pico en febrero-marzo y temperaturas menores entre mayo-agosto. En cuanto a la distribución espacial de los cambios de temperatura, algunas de las unidades al sur y centro del área sufrirán cambios de temperatura entre 4 y 4.2%; las zonas al nororiente presentarán cambios de entre 4.2 y 4.5% y tres unidades que tienen porciones en la cordillera Oriental, tendrán cambios mayores a 5% (Figura 12).



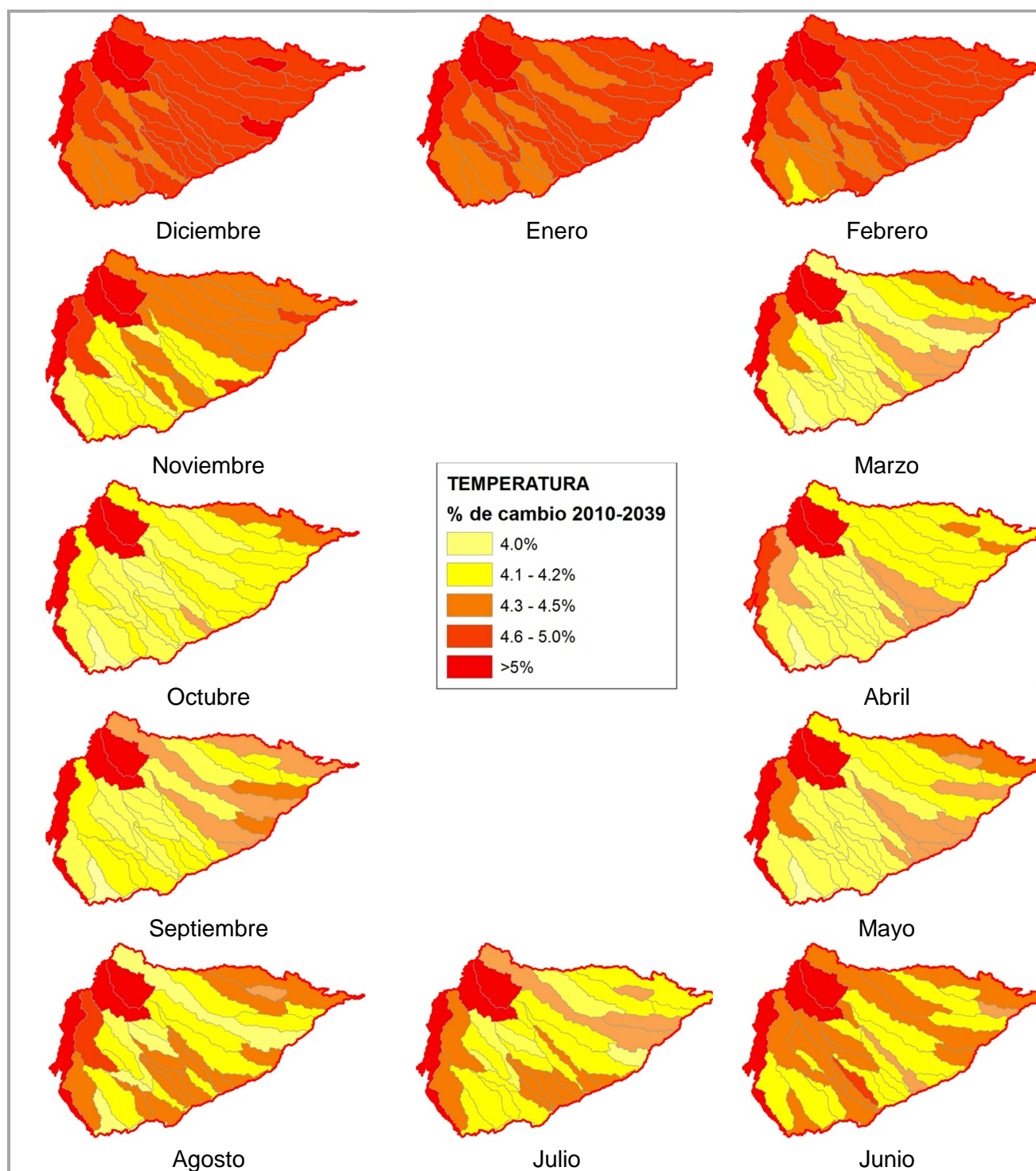
**Figura 11: Temperatura media mensual del área de estudio**

Actual: temperatura de referencia 1950-2000, 2010-2039: predicción de temperatura para este periodo, Media $\pm$ SD: Valor de la media más o menos una desviación estándar



**Figura 12: Porcentaje de cambio en temperatura promedio anual en cada unidad de análisis, periodo 2010-2039**

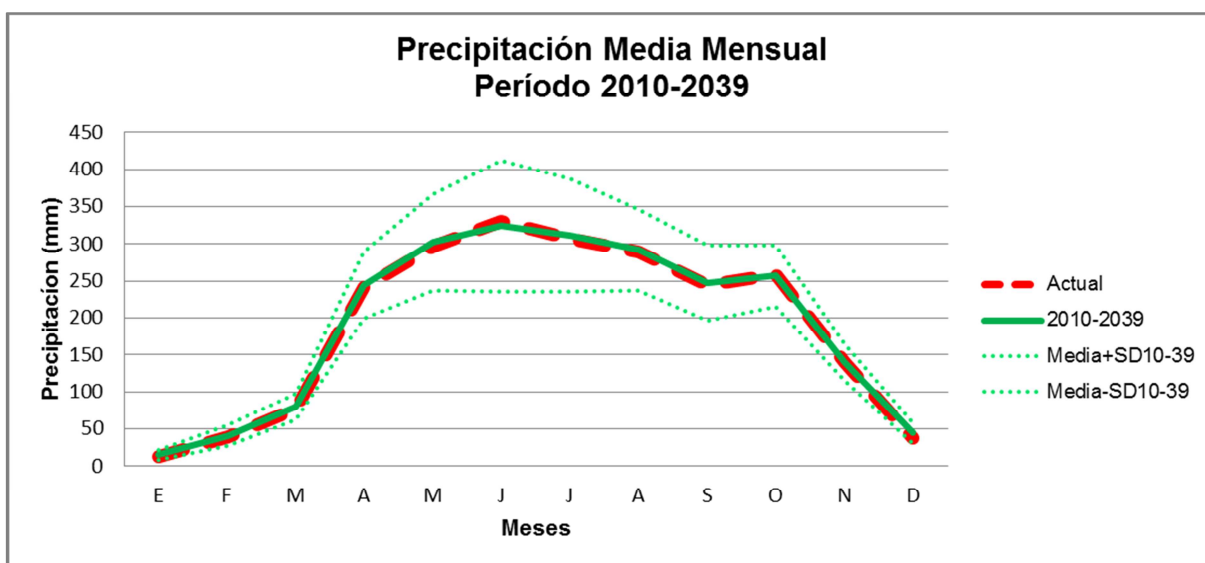
En cuanto a los patrones de distribución por meses encontré que diciembre, enero y febrero tendrán los porcentajes de cambio más altos que el resto de los meses; octubre será el mes con cambios más bajos, mientras que los demás meses presentarán cambios bajos y medios en la mayor parte del área de estudio. La zona ubicada a elevaciones mayores, tendrán cambios altos (más de 5%) durante todo el año. Así mismo, las unidades ubicadas en la zona nororiental, presentarán cambios en algunos meses más altos que los presentados en la zona sur (Figura 13).



**Figura 13: Porcentaje de cambio de temperatura promedio mensual, periodo 2010-2039**

## Cambio en la precipitación

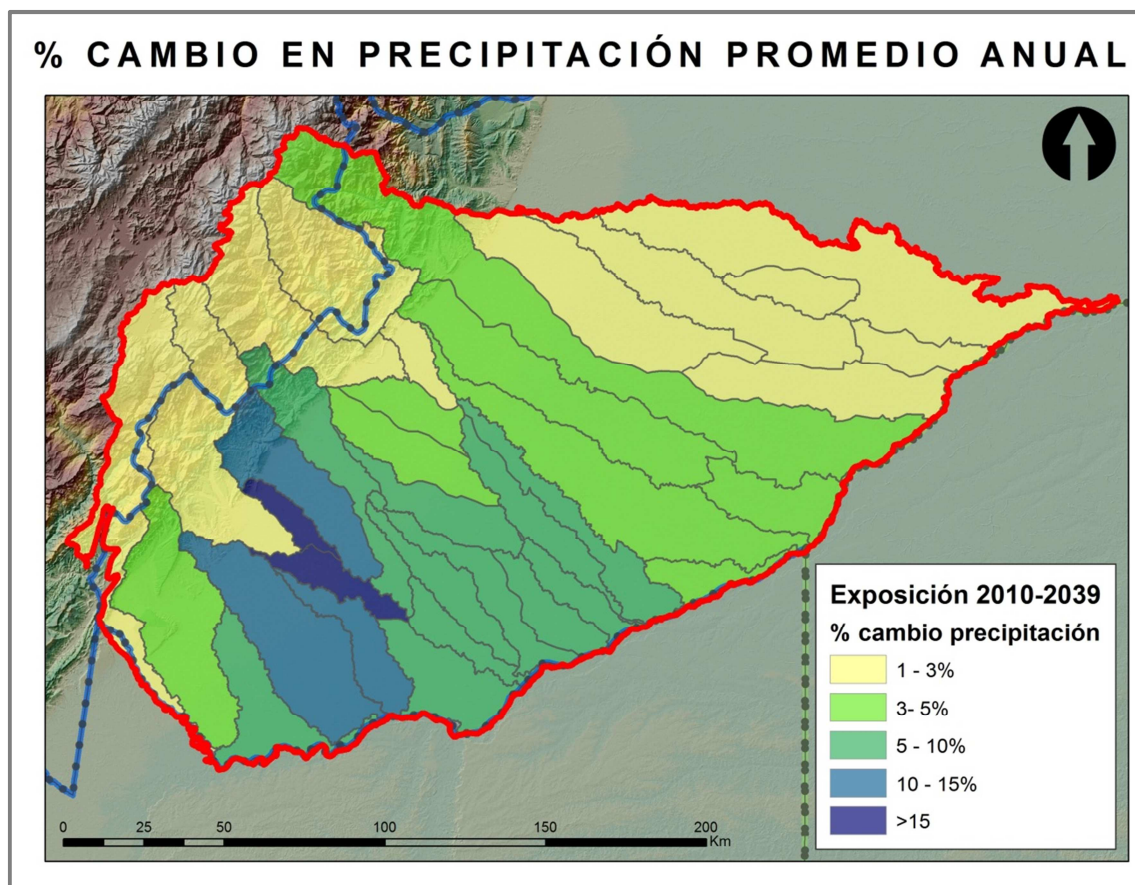
Para el periodo 2010-2039 encontré que la precipitación en el área de estudio variará 4.2% con una desviación estándar de  $\pm 7.3$ . Los mayores aumentos se producirán en el mes de diciembre con 17.3% y en el mes de enero de casi 21%. Los meses con menor aumento serán abril, septiembre, y agosto con cambios entre 0.8 y 1%. Tres meses presentarán leves disminuciones en la precipitación: noviembre, octubre y julio con disminuciones de 0.2, 0.7 y 2%, respectivamente. Como se ve en la Figura 14, el comportamiento de la precipitación futura no diferirá mucho del presentado en los valores de referencia: habrá un pico de precipitación entre los meses de abril-octubre y una disminución entre los meses de noviembre a marzo. En cuanto a la distribución espacial de algunas de las unidades al sur y centro, presentarán cambios medios a altos en el aumento de la temperatura, las unidades al norte y en la cordillera Oriental se darán los niveles más bajos (Figura 15).



**Figura 14: Precipitación media mensual del área de estudio, periodo 2010-2039**

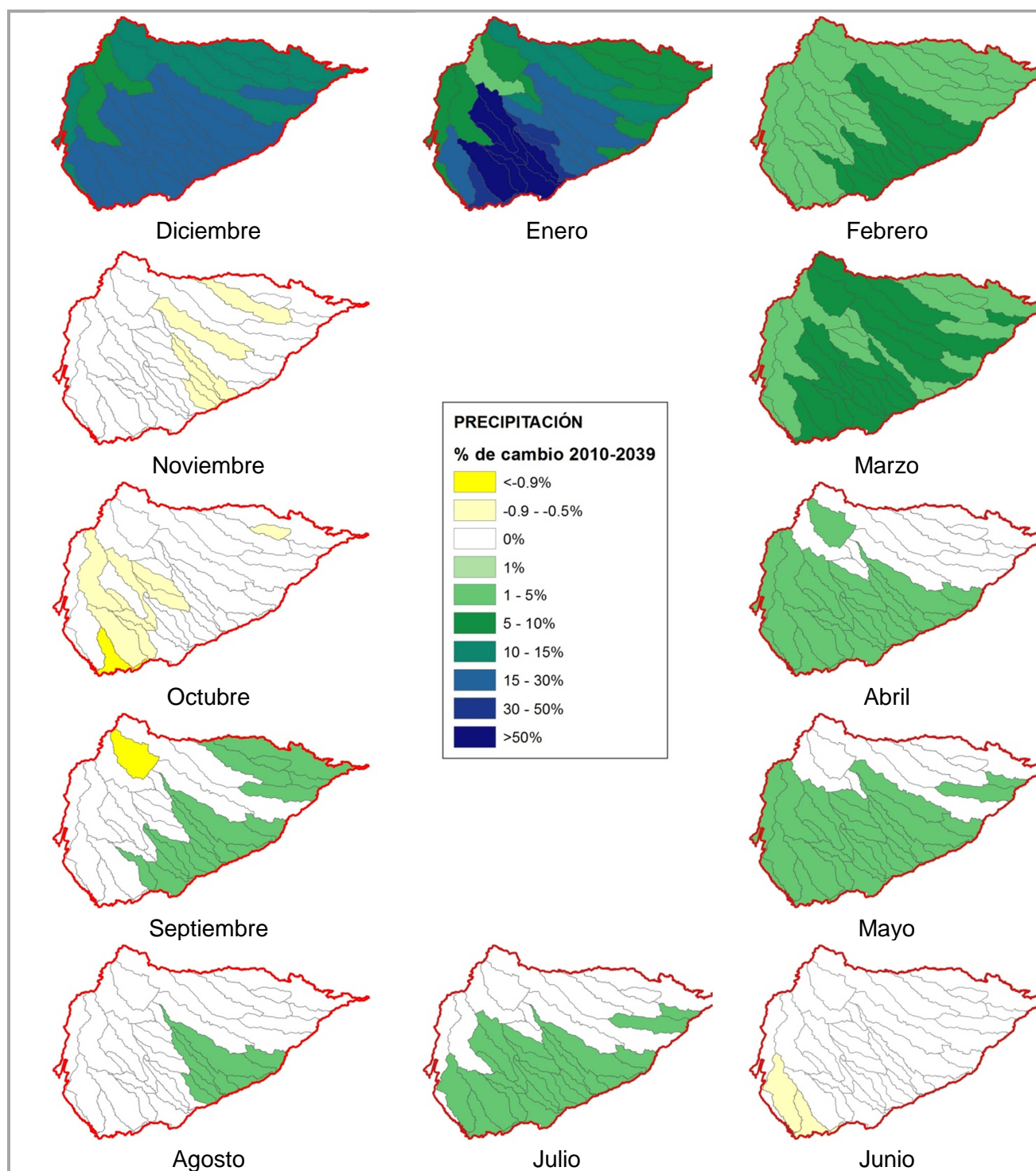
Actual: precipitación de referencia 1950-2000, 2010-2039: predicción de precipitación para este periodo, Media $\pm$ SD: Valor de la media más o menos una desviación estándar





**Figura 15: Porcentaje de cambio en precipitación promedio anual en cada unidad de análisis, periodo 2010-2039**

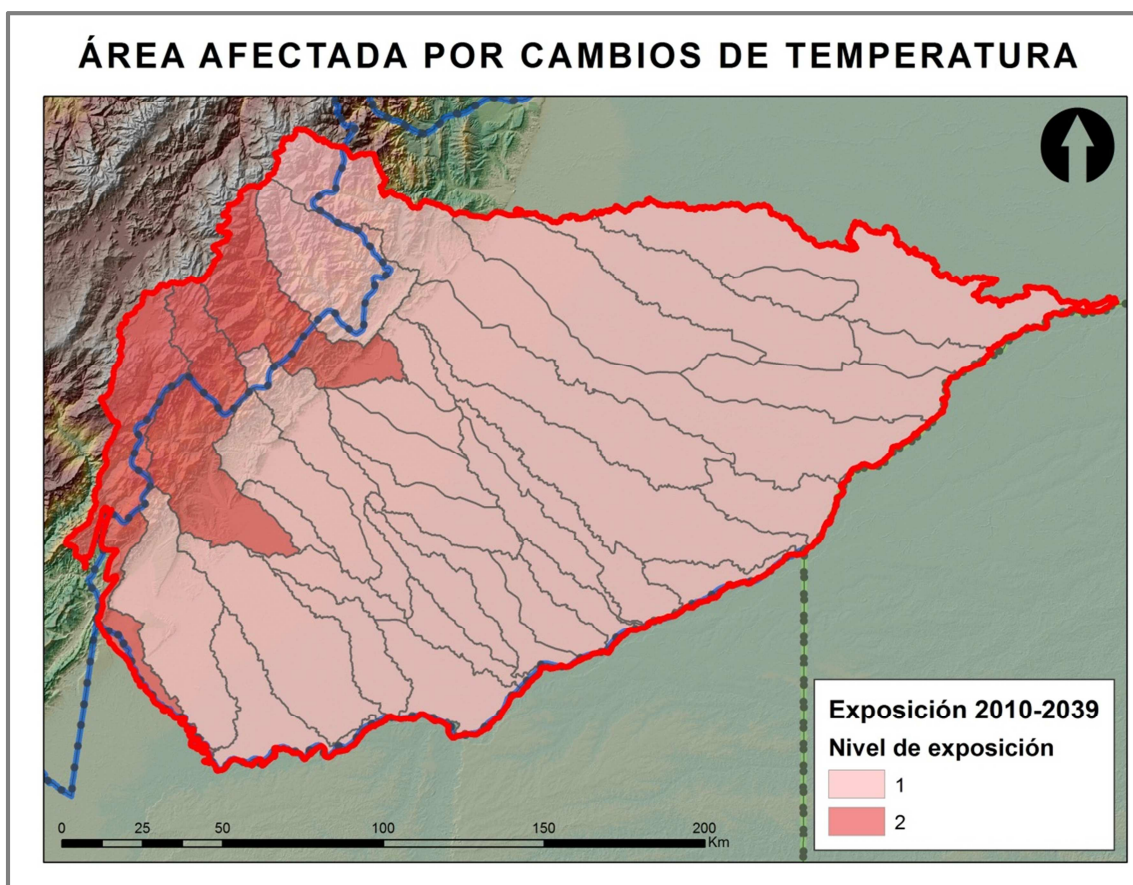
En cuanto a los patrones de distribución por meses hallé (Figura 16) que entre diciembre y marzo, la precipitación aumentará en toda la zona de estudio hasta un 20%, mientras que en junio, octubre y noviembre la precipitación disminuirá hasta un 1% o se mantendrá en el mismo nivel que los valores de referencia. En los demás meses presentarán en algunas zonas, aumentos de hasta un 10% y en algunos casos disminuciones pequeñas de 0.9% o se mantendrán iguales. Las unidades ubicadas en el norte del área de estudio tendrán cambios bajos o nulos, mientras que el centro y el sur presentarán cambios de máximo aumento y disminución en algunos meses.



**Figura 16: Porcentaje de cambio de precipitación promedio mensual, periodo 2010-2039**

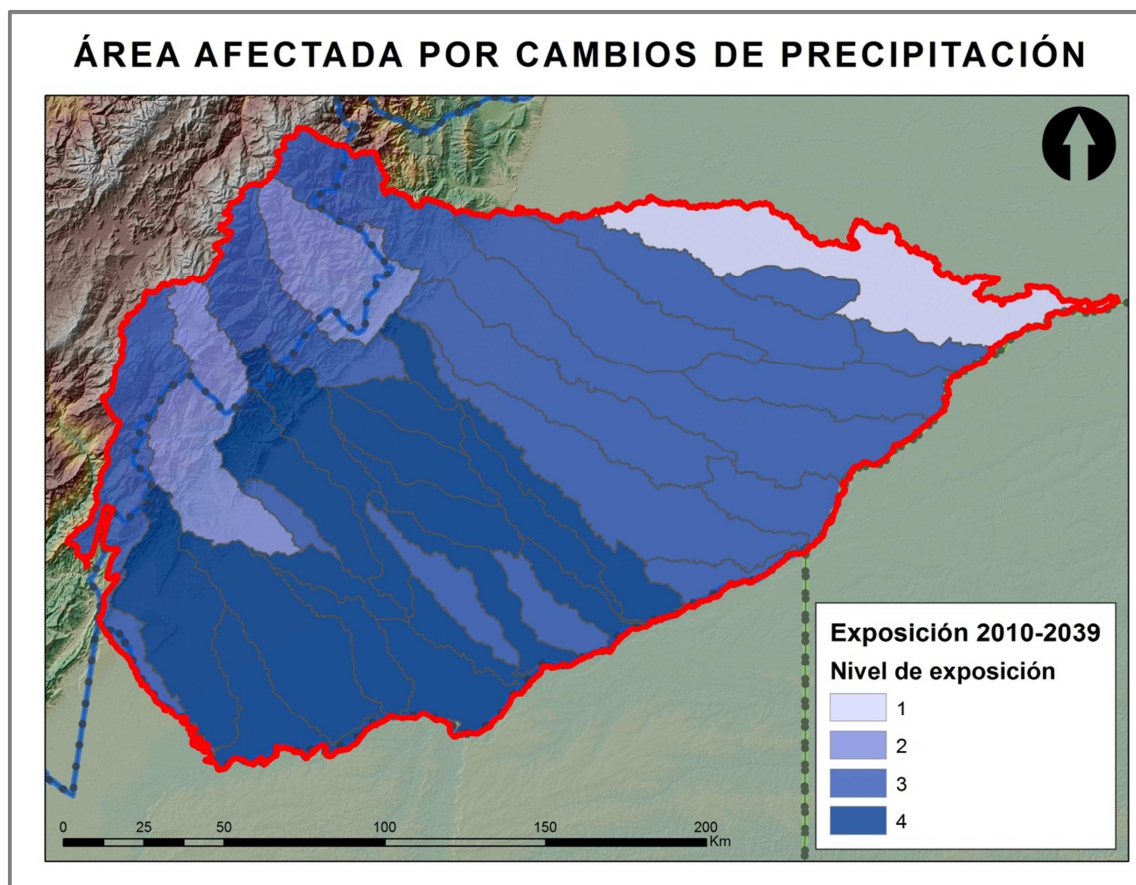
### Área afectada por cambios de temperatura y precipitación.

El porcentaje del área que cambia en las proyecciones a futuro respecto a los valores de referencia de temperatura, es pequeño, resultando un nivel de exposición bajo (Figura 17). Para tres unidades del análisis, entre el 30-40% de su área sufrirá cambios en la precipitación predicha respecto a la referencia. Para el caso de la precipitación, el porcentaje que cambiará entre la época de referencia y las predicciones del futuro, será mayor que en el caso de la temperatura, sin embargo, solo alcanza niveles de exposición bajos (Figura 18).



**Figura 17: Nivel de exposición por unidad de análisis por área afectada por cambios de temperatura, periodo 2010-2039**



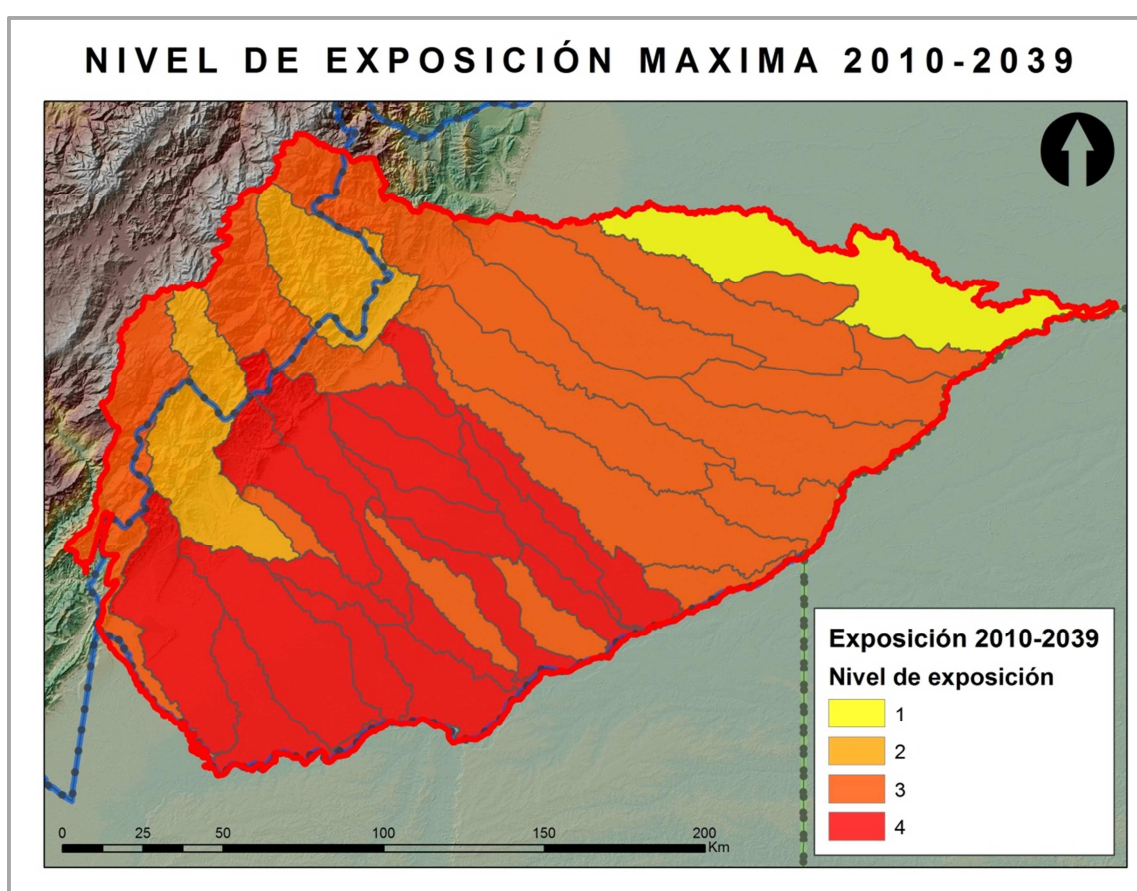


**Figura 18: Nivel de exposición de las unidades de análisis por área afectada por cambios de precipitación, periodo 2010-2039**



### Exposición Periodo 2010-2039

La combinación de las anteriores variables en un solo componente, para evaluar la vulnerabilidad del área de estudio, fue baja para el periodo 2010-2039. Las unidades ubicadas en la porción sureste, tienen niveles de exposición iguales a 4. Este valor corresponde al nivel bajo del componente. Las unidades ubicadas en el norte tendrán menores niveles de exposición (Figura 19).

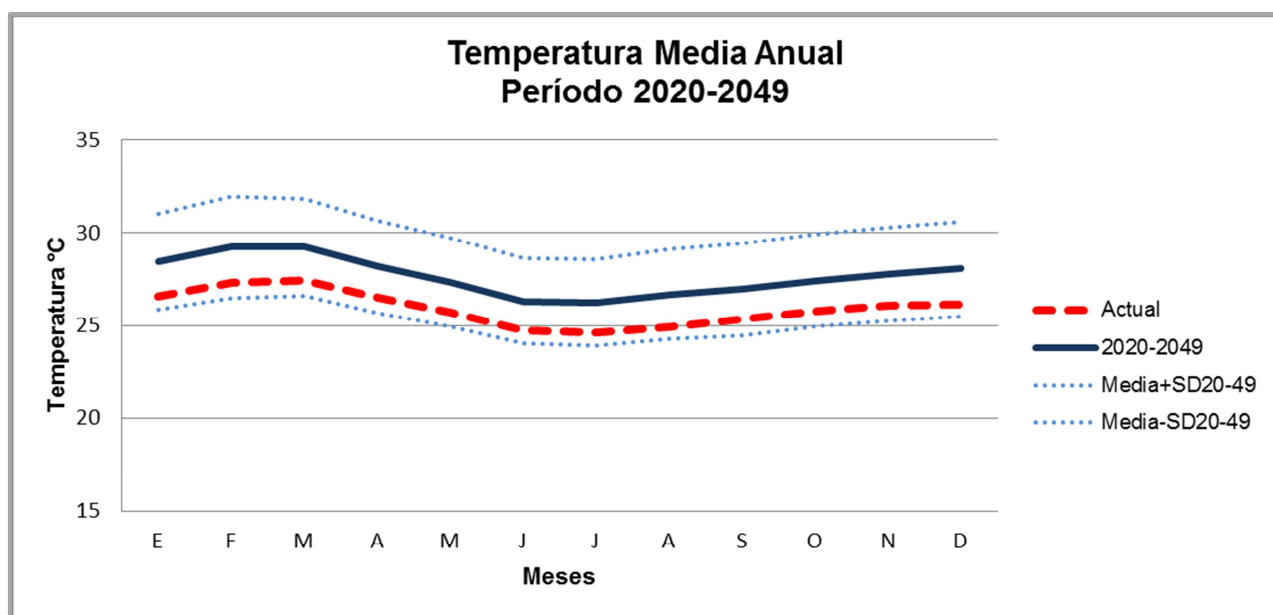


**Figura 19: Nivel de exposición máxima en las unidades de análisis, en el periodo 2010-2039**

### 5.2.2 Período 2020-2049

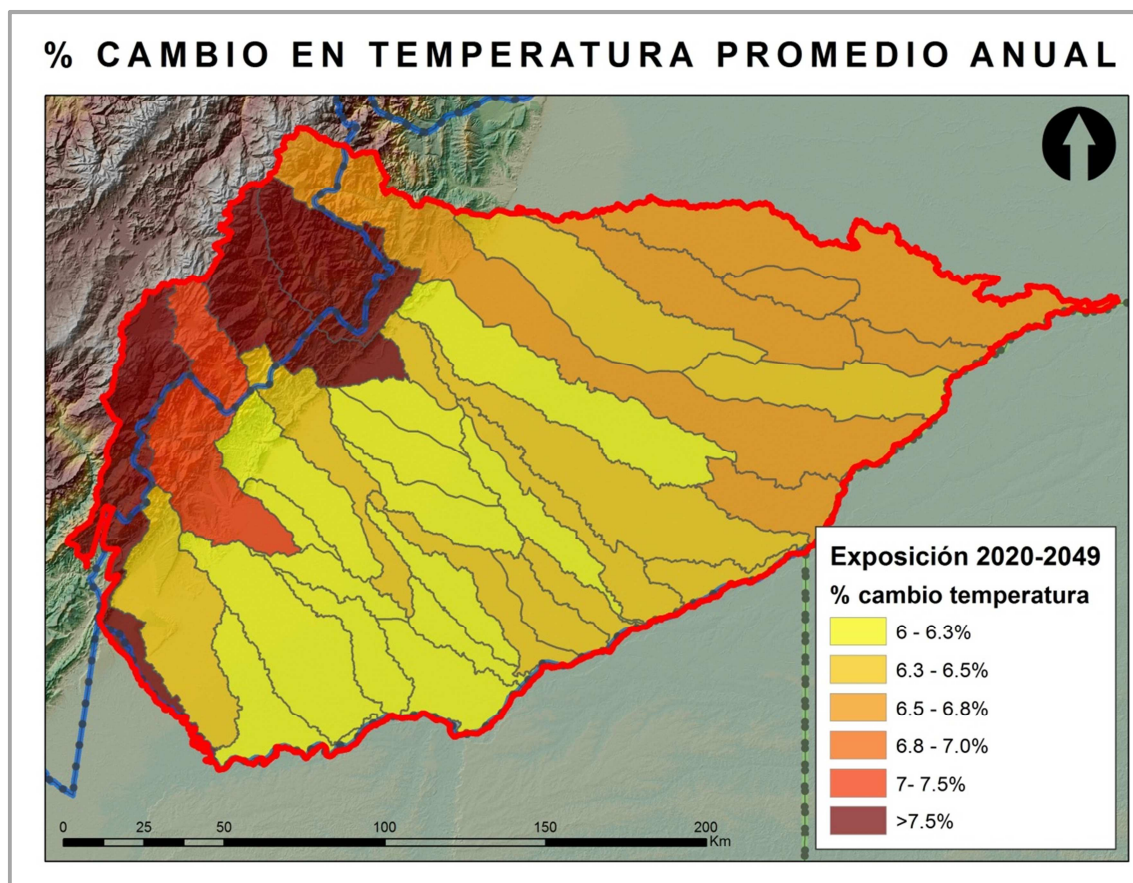
#### Cambios en la Temperatura

Para el periodo 2020-2049 encontré que la temperatura en el área de estudio aumentará en promedio 6.2% ( $\pm 0.31$ ), siendo diciembre, enero y agosto los meses con mayores aumentos (6.8%, 6.6% y 6.5%, respectivamente) y abril, octubre y mayo aumentos cercanos a 5.9%. Al igual que para el periodo 2010-2039, la temperatura, seguirá el mismo patrón de cambio, pero en la Figura 20 se ve que el valor medio predicho es más alto que el de referencia. En cuanto a la distribución espacial de los cambios de temperatura, algunas de las unidades al sur y centro tendrán cambios de temperatura entre el 4 y el 4.2%, las zonas al nororiente de entre 4.2 y 4.5% y tres unidades que tienen porciones en la cordillera Oriental cambios mayores a 5% (Figura 21).



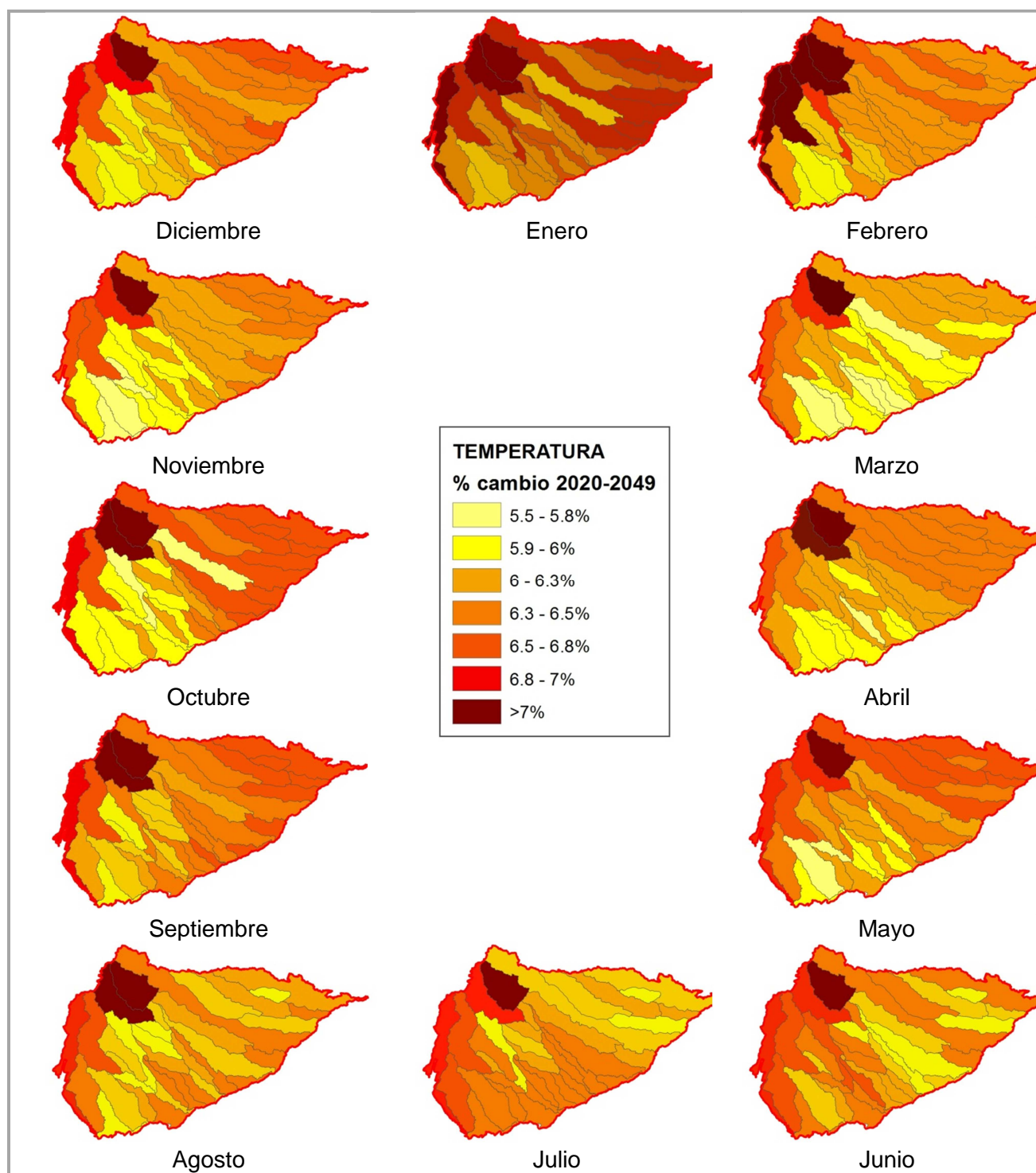
**Figura 20: Temperatura media mensual del área de estudio, periodo 2020-2049**

Actual: temperatura de referencia 1950-2000, 2010-2039: predicción de temperatura para este periodo, Media $\pm$ SD: Valor de la media más o menos una desviación estándar



**Figura 21: Porcentaje de cambio en temperatura promedio anual en cada unidad de análisis, periodo 2020-2049**

En cuanto a los patrones de distribución por meses hallé que enero será el mes con mayor aumento en la temperatura. En la mayoría de meses, el cambio en las unidades del nororiente de la zona de estudio será mayor que en la porción sur. De igual manera que entre 2010 y 2039, las unidades que están en la cordillera presentarán los mayores cambios de todo el área de estudio (Figura 22).



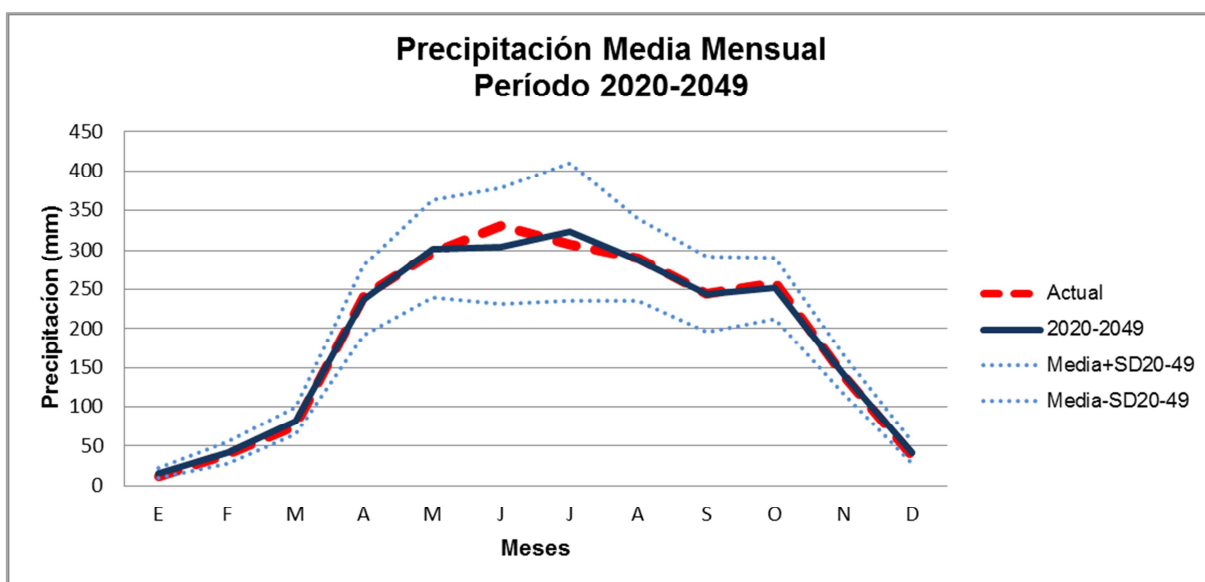
**Figura 22: Porcentaje de cambio de temperatura promedio mensual, periodo 2020-2049**



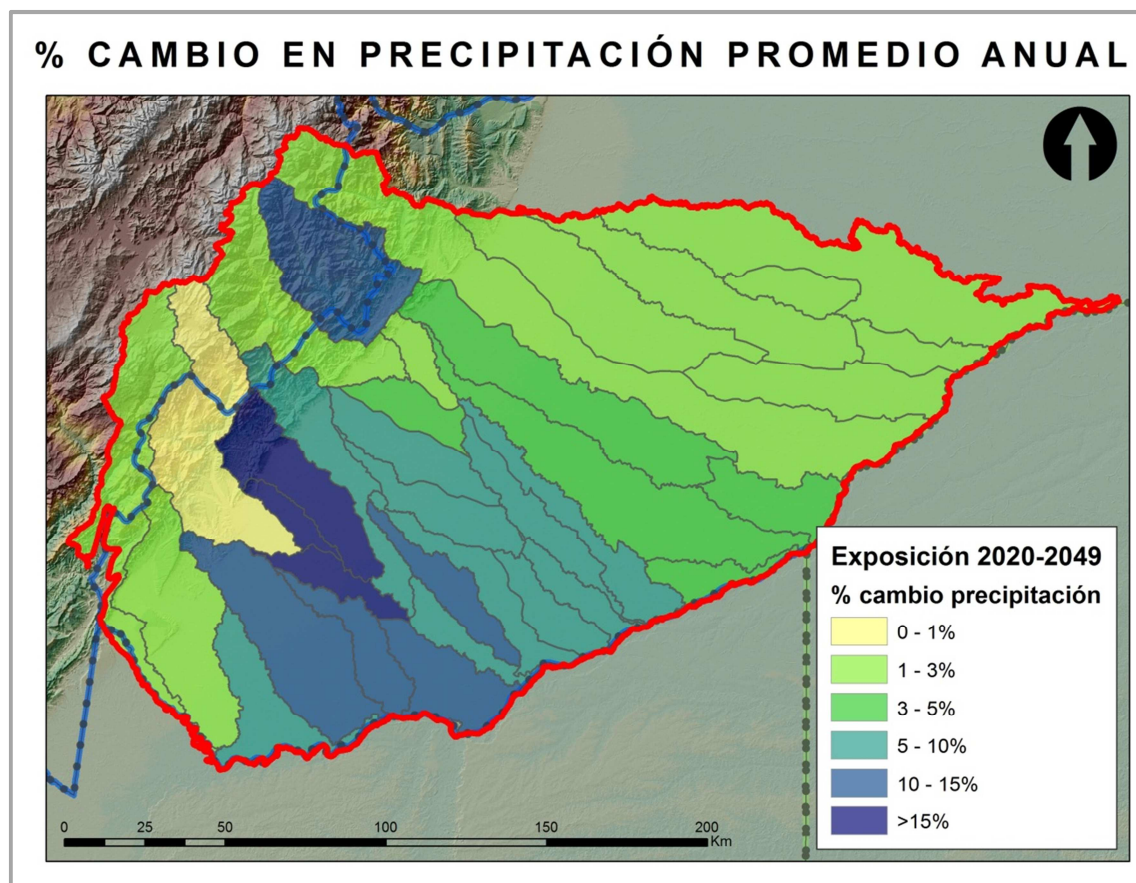
### Cambio en la precipitación

Para el periodo 2020-2049 encontré que la precipitación en el área de estudio variará 4.4% con una desviación estándar más alta que la obtenida para el periodo 2010-2039 ( $\pm 10.5$ ). Para ese periodo, la precipitación aumentará hasta un 32% en enero y disminuirá hasta un 7% en el mes de junio. Por esta razón puede que la desviación estándar sea más alta que en el periodo pasado. Aumentos mayores al 5% ocurrirán también en los meses de diciembre, febrero y marzo, mientras que de agosto a octubre la precipitación disminuirá entre un 1 y un 3%.

La Figura 23 muestra como la precipitación predicha para el periodo 2020-2049 seguirá el mismo patrón de comportamiento que la referencia, a excepción de los meses de junio-agosto cuando cambiará un poco este comportamiento. En cuanto a la distribución espacial algunas de las unidades al centro tendrán los porcentajes más altos de variación; mientras que unidades al norte, presentarán porcentajes bajos en el aumento de esta variable. Una unidad ubicada en la cordillera Oriental y parte en la llanura presentará una disminución de la precipitación cerca de 1% (Figura 24).

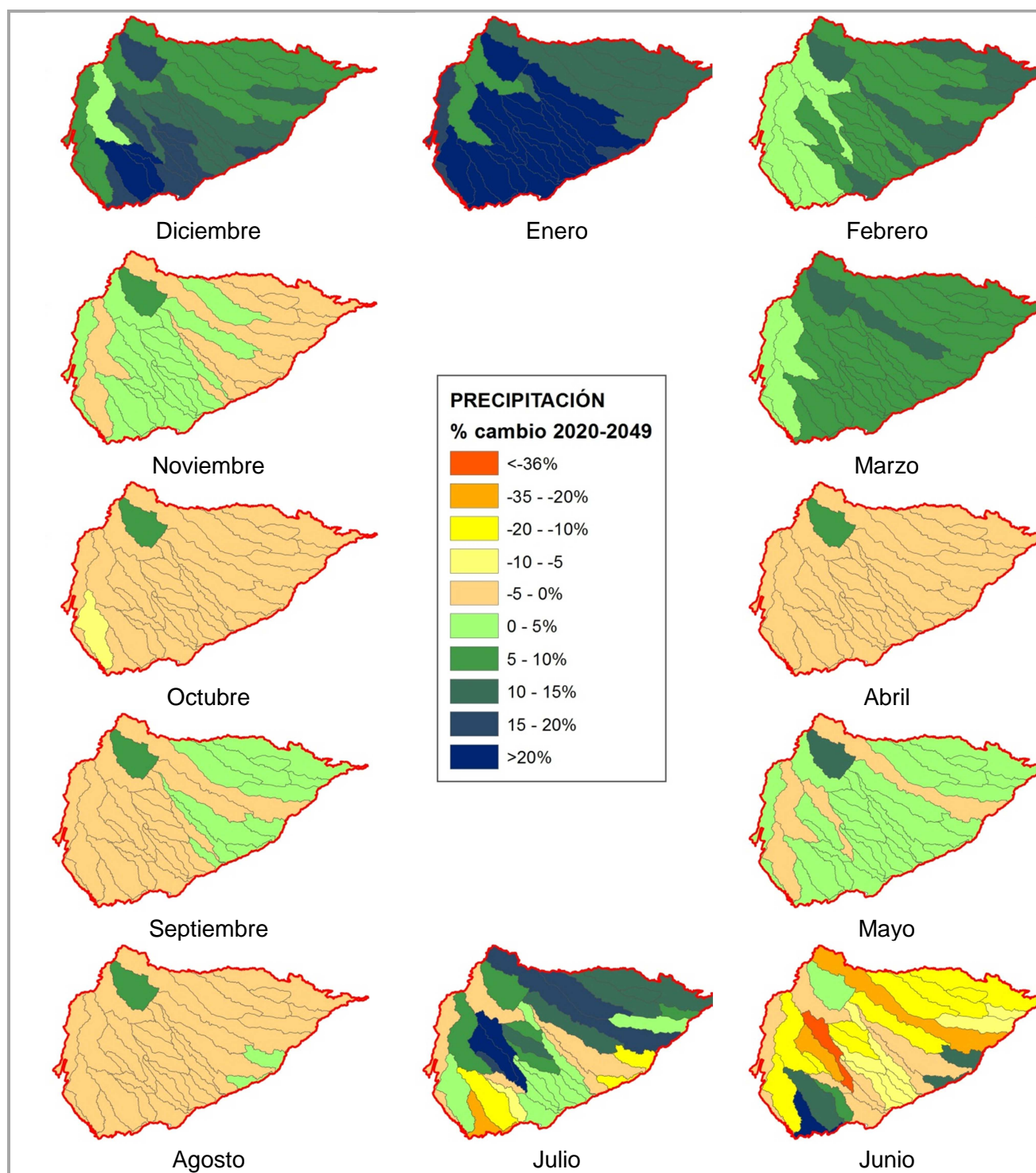


**Figura 23:** Precipitación media mensual del área de estudio, periodo 2020-2049  
 Actual: temperatura de referencia 1950-2000, 2010-2039: predicción de temperatura para este periodo, Media $\pm$ SD: Valor de la media más o menos una desviación estándar



**Figura 24: Porcentaje de cambio en precipitación promedio anual en cada unidad de análisis, periodo 2020-2049**

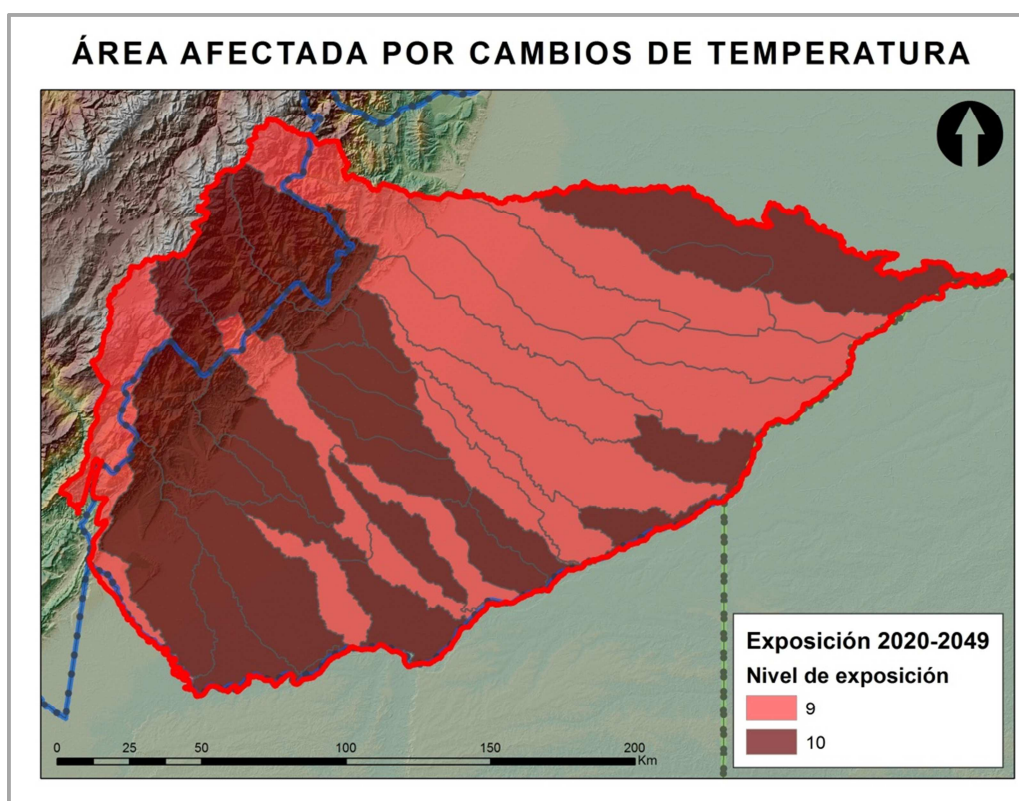
En cuanto a los patrones de distribución por meses, entre diciembre y marzo la precipitación aumentará en toda la zona de estudio, mientras que en abril, junio, agosto y octubre la precipitación disminuirá en casi toda el área de estudio, alcanzando hasta un 35% en junio. Para los otros meses, la disminución será de solo de 5%. Los meses de mayo, julio, septiembre y noviembre, mostrarán patrones de disminución en algunas unidades y aumento en otras. Una de las unidades que se ubica en la cordillera, muestra en todos los meses un aumento en la precipitación. El occidente muestra para todos los meses, menos enero, cambios menores de precipitación comparados con el resto del área y en junio exhibe la máxima disminución (Figura 25).



**Figura 25: Porcentaje de cambio de precipitación promedio mensual, periodo 2020-2049**

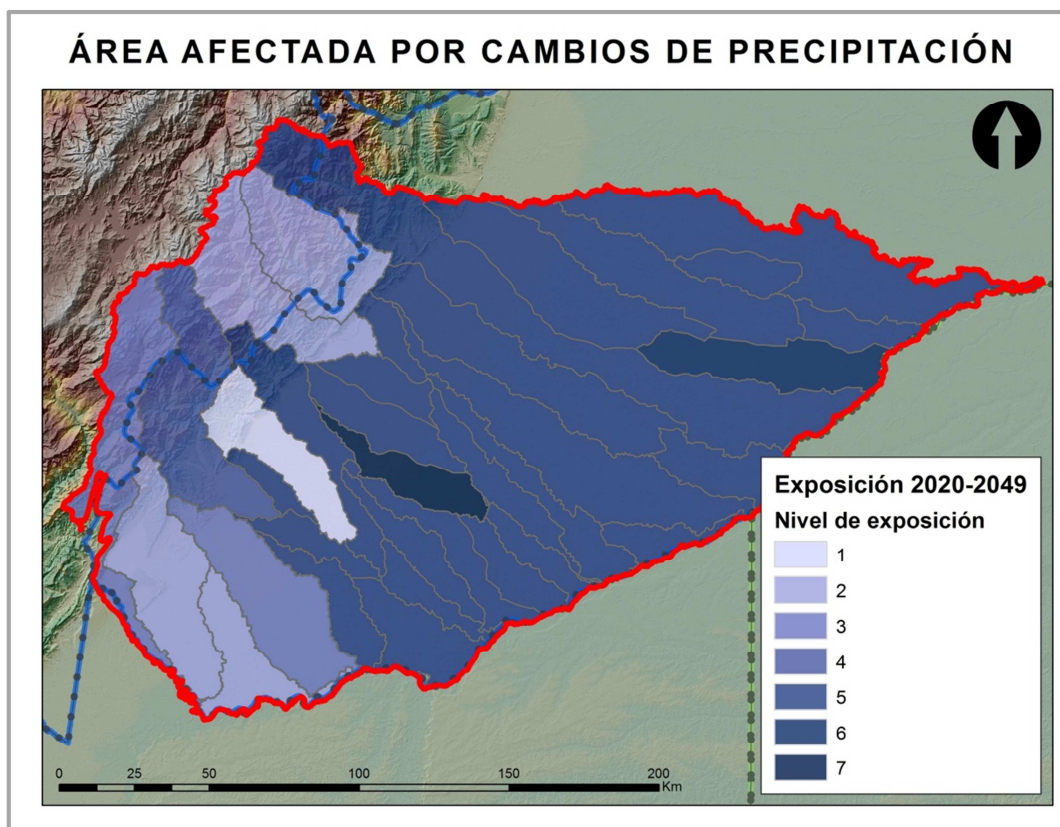
### Área afectada por cambios en temperatura y precipitación

Al calcular el porcentaje de área afectada por los cambios futuros para la temperatura, resultó que la exposición en este periodo será alta y muy alta (Figura 26). Por su parte, para el porcentaje de áreas afectadas por efecto de la precipitación en el futuro, ocho unidades presentarán pocos cambios y por consiguiente niveles de exposición bajos y las restantes unidades, niveles medios de exposición (Figura 27).



**Figura 26: Nivel de exposición por unidad de análisis por área afectada por cambios de temperatura, periodo 2020-2049**

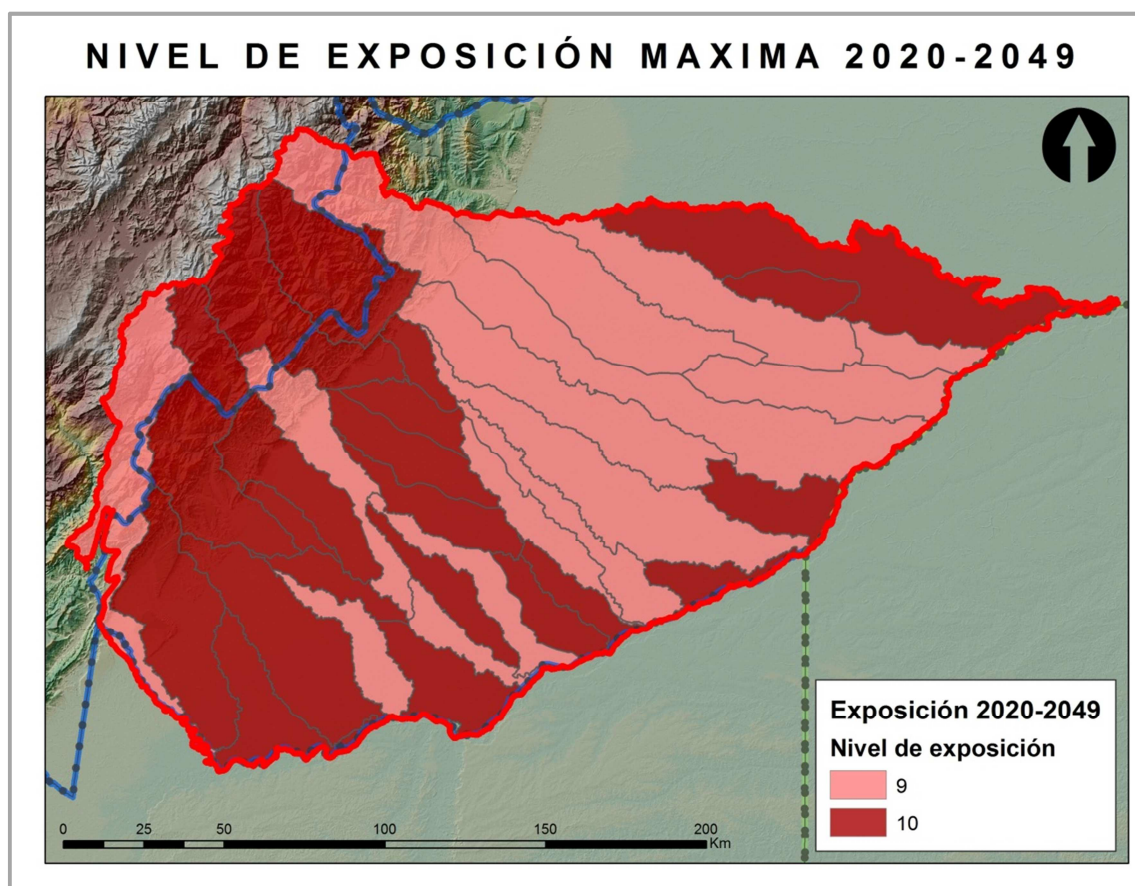




**Figura 27:** Nivel de exposición de las unidades de análisis por área afectada por cambios de precipitación, periodo 2020-2049

### Exposición Periodo 2020-2049

La combinación de las variables que evalúan la exposición al cambio climático en el periodo 2020-2049, resultaron en niveles altos y muy altos de exposición para el área de estudio. Las unidades de análisis ubicadas en el suroccidente y algunas en el norte, estarán expuestas a niveles muy altos y las restantes a niveles altos (Figura 28).

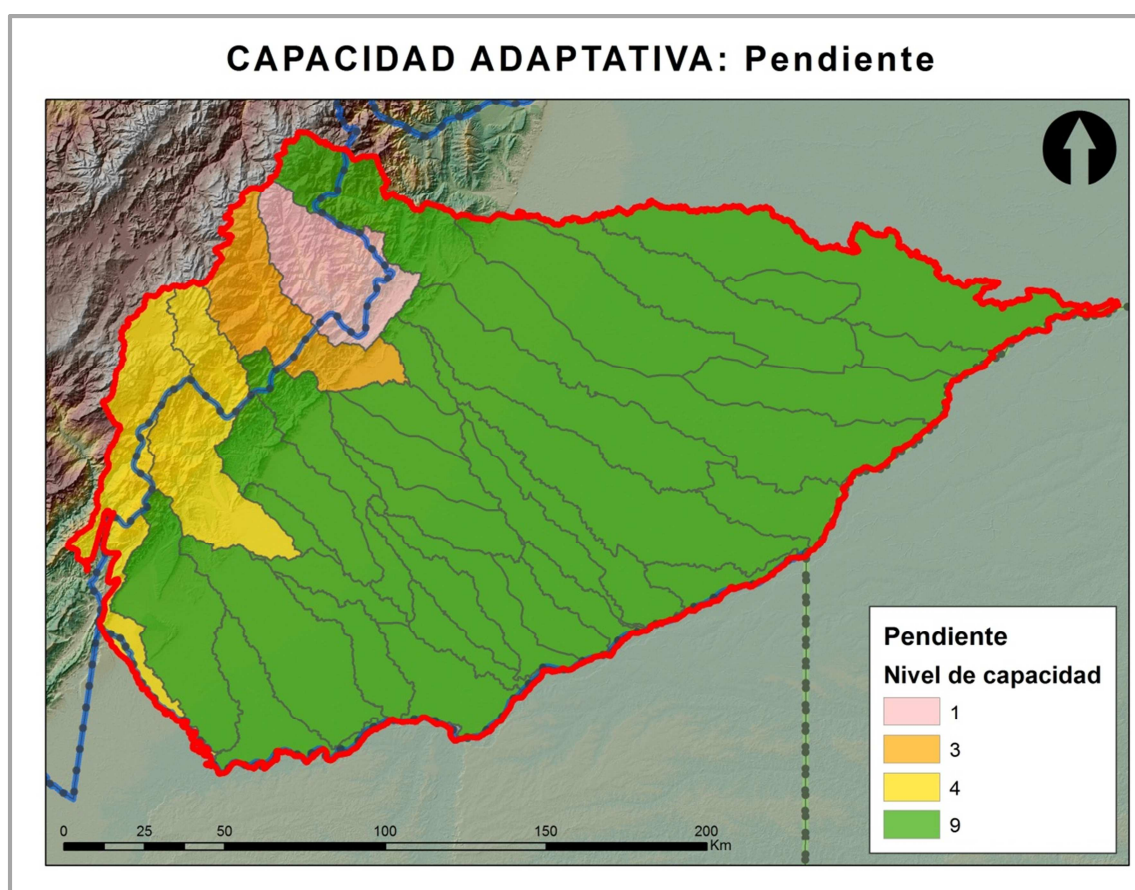


**Figura 28: Nivel de exposición máxima en las unidades de análisis, periodo 2020-2049**

### 5.3 Cuantificación de la Capacidad adaptativa

#### Pendiente del terreno

Para la región hallé que las pendientes van entre los 0 y los 73 grados de inclinación del terreno. La mayor porción del área de estudio, presentó pendientes planas entre 0 y 2 grados de inclinación (82%). Obtuve 31 unidades, con una capacidad adaptativa alta, al tener pendientes planas a suaves, cuatro unidades tuvieron una capacidad adaptativa media y solo una tuvo capacidad adaptativa baja, al tener pendientes muy pronunciadas. Las unidades con niveles bajos y medio corresponden a las zonas de montaña (Figura 29).

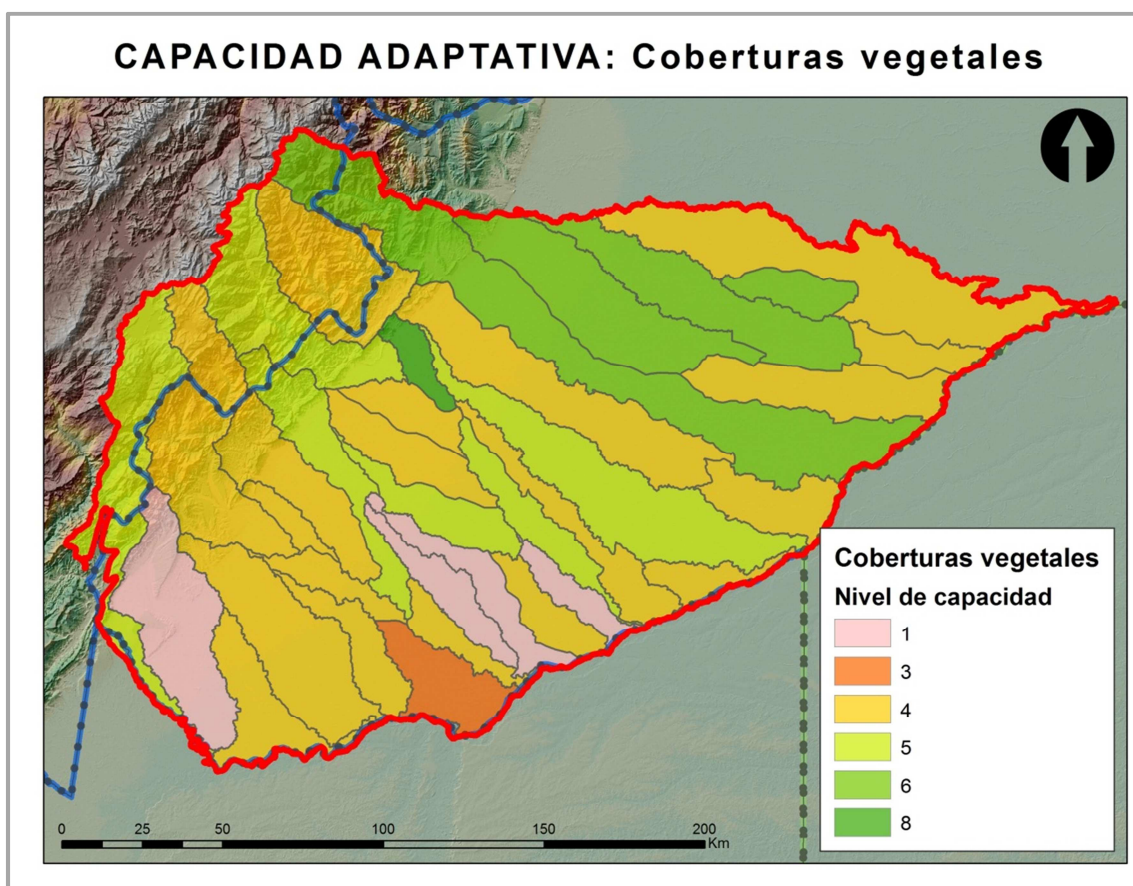


**Figura 29: Nivel de capacidad adaptativa por pendiente del terreno en las unidades de análisis**



### Cantidad de tipos de coberturas vegetales

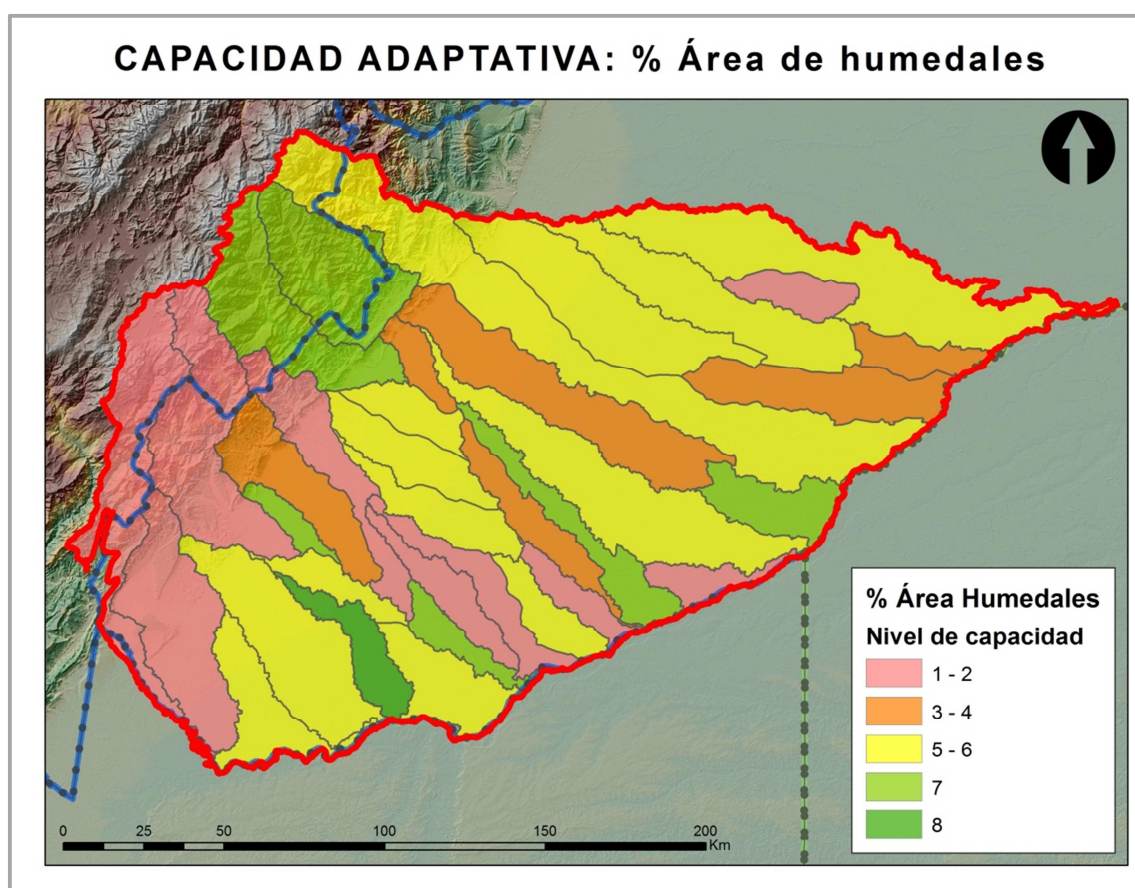
Solo una unidad de análisis tuvo una capacidad adaptativa alta al tener más de 11 coberturas vegetales diferentes. Esta unidad tiene una porción en el piedemonte del área de estudio y en la sabana. Diez unidades más, tuvieron entre siete y ocho coberturas vegetales diferentes, un nivel de capacidad adaptativo medio y 24 mostraron entre 3 y 6 coberturas vegetales teniendo una capacidad baja (Figura 30). Las unidades con nivel medio tienen grandes extensiones y algunas ocupan rangos altitudinales amplios. Por su parte, las unidades con pocas coberturas vegetales, están ubicadas principalmente en la llanura donde las coberturas vegetales son más homogéneas en la escala del mapa de referencia.



**Figura 30: Nivel de capacidad adaptativa por tipos de coberturas vegetales en las unidades de análisis**

### Área de humedales

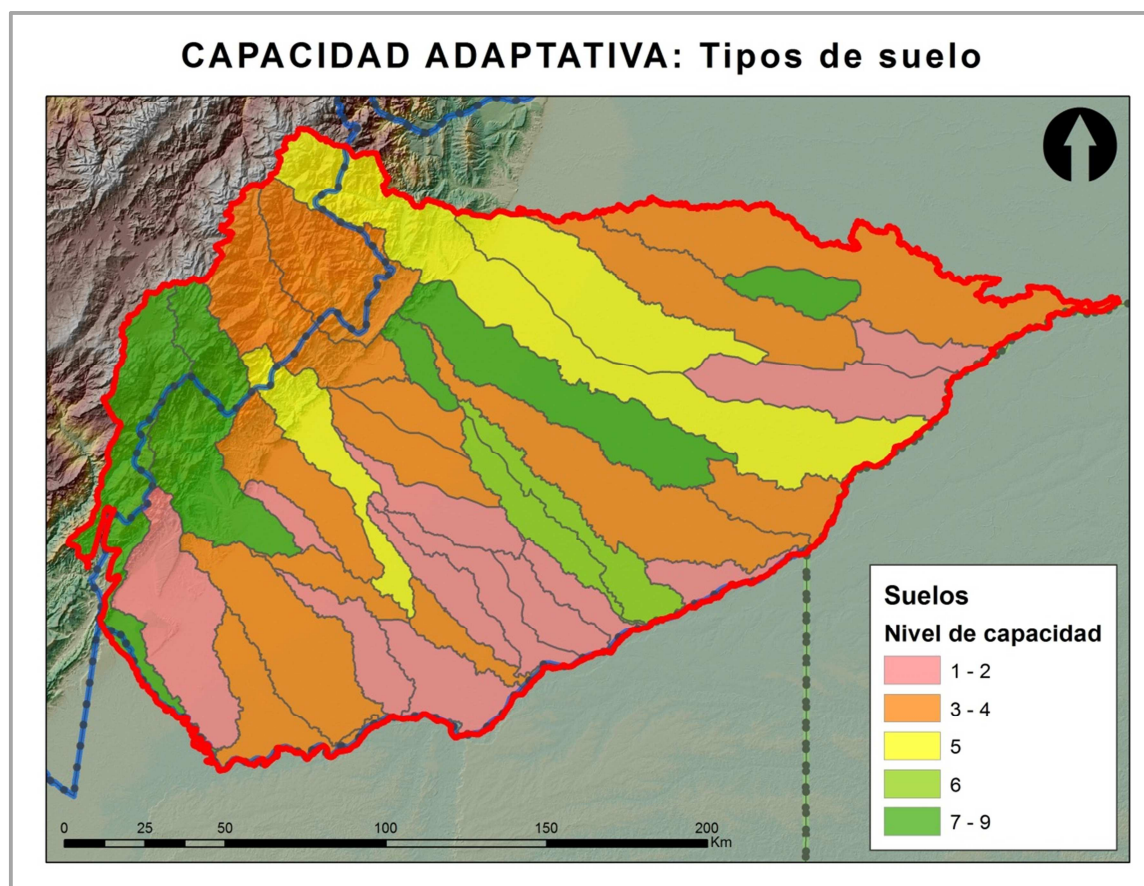
Solo una unidad resultó con más del 80% de su área en coberturas de humedales y consecuentemente una capacidad adaptativa alta; 19 unidades tuvieron entre el 50-70% de área en humedales, con un nivel de capacidad adaptativa medio y 15 más tuvieron menos del 40% de área en humedales y niveles de capacidad adaptativa bajos (Figura 31). Las unidades con los valores más altos de capacidad adaptativa tienen menor área respecto a otras áreas con nivel medio de capacidad adaptativa, por lo que la mayor parte de su área está ocupada por estos ecosistemas de humedales. En contraste algunas unidades con entre 50 a 70% de humedales, ocupan grandes extensiones. Algunas áreas del suroeste tienen capacidad adaptativa baja.



**Figura 31: Nivel de capacidad adaptativa por área de humedales en las unidades de análisis**

### Cantidad de tipos de suelos

Cinco unidades tuvieron capacidad adaptativa alta y cinco más capacidad media. Las restantes 25 tuvieron menos de 10 tipos de suelos, es decir una capacidad adaptativa baja (Figura 32). Algunas de las áreas con baja capacidad adaptativa, están ubicadas en la zona plana. Las unidades con capacidad adaptativa media y alta ocupan extensiones en varias elevaciones incluyendo zonas en el piedemonte y la cordillera andina.



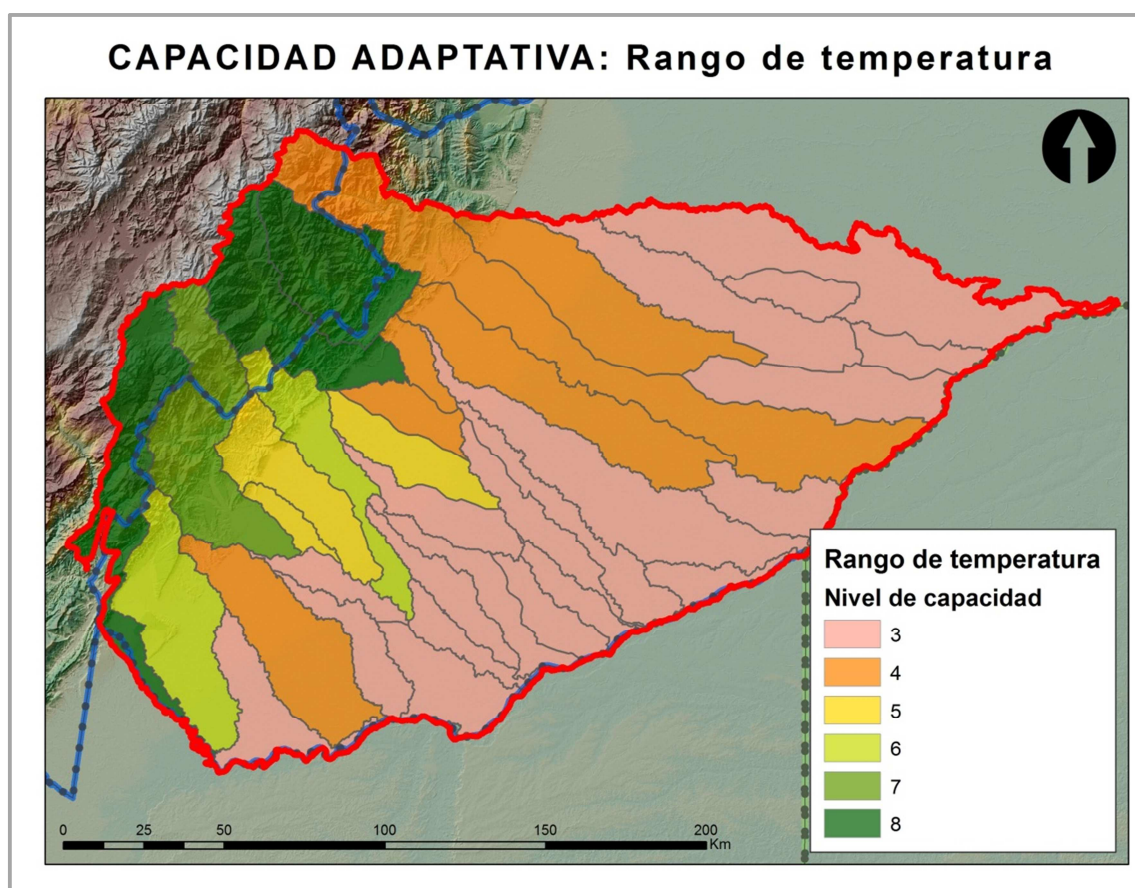
**Figura 32: Nivel de capacidad adaptativa por tipos de suelos en las unidades de análisis**

### Amplitud de nicho climático

**Temperatura:** Tres unidades presentaron altos valores de capacidad adaptativa, con rangos de temperatura anual entre 9 y 12°C. Siete unidades de análisis evidenciaron rangos anuales 4 y 7°C y una capacidad adaptativa media y



26 unidades resultaron con capacidad baja y un rango de temperatura entre 1 y 4°C (Figura 33). Las unidades con rangos estrechos de temperatura están ubicadas principalmente en la zona plana, mientras que las de rango medio alcanzan porciones de la llanura y el piedemonte y las de más amplio rango, ocupan incluso las zonas más altas de la cordillera. La cuenca del río Pauto, que se extiende desde el río Meta hasta la zona alta de la cordillera, obtuvo un nivel de capacidad adaptativa alta.

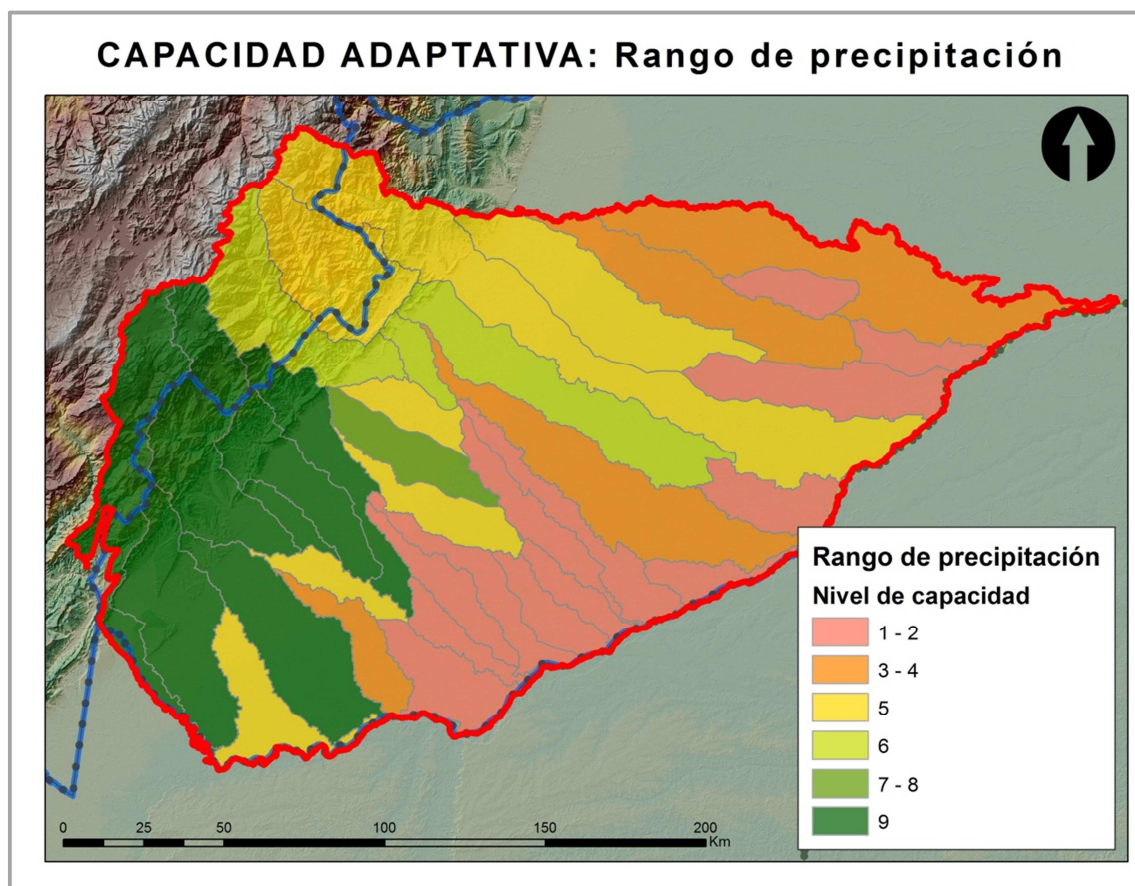


**Figura 33: Nivel de capacidad adaptativa por rango de precipitación en las unidades de análisis**

### ***Precipitación:***

Siete unidades de análisis presentaron rangos de precipitación anual entre 1650 y 2000 mm o más y fueron catalogados con valores de capacidad adaptativa alta. Seis unidades más tuvieron rangos de precipitación entre 1250 y 1650 mm

(capacidad adaptativa media) y 22 unidades con rangos de precipitación entre 800 y 1250 mm, mostraron un valor de capacidad adaptativa baja (Figura 34). Las unidades rangos estrechos de precipitación, ocupan las zonas altitudinales más bajas y cercanas al río Meta y las zonas con rangos más amplios, ocupan porciones de llanura, piedemonte y montañas altas.



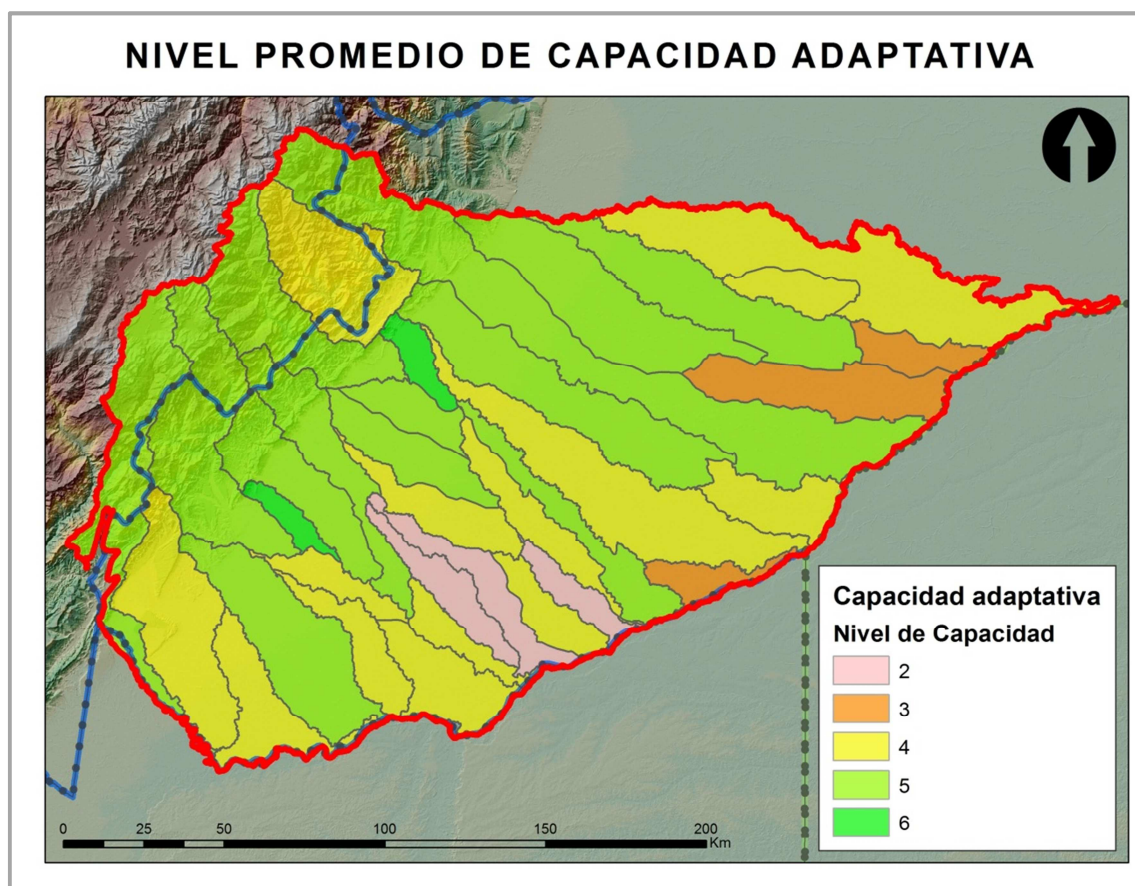
**Figura 34: Nivel de capacidad adaptativa por rangos de precipitación en las unidades de análisis**

### **Capacidad adaptativa**

Al combinar los factores de capacidad adaptativa, ninguna unidad de análisis alcanzó un nivel alto, 15 unidades tuvieron niveles medios y 20 unidades valores bajos (Figura 35). La mayoría de unidades con capacidad adaptativa baja ocupan las zonas más plana y de menor altitud del área de estudio. Las áreas con capacidad media, se extienden desde la llanura hasta la zona de alta montaña, a



excepción de la unidad Caño 2, que tiene un nivel bajo. Las dos unidades con nivel de capacidad adaptativa de 6, el máximo valor obtenido, son el Caño Tinije y el Caño Tocaría, unidades con menos de 30 mil hectáreas y rangos altitudinales de menos de 300 m.

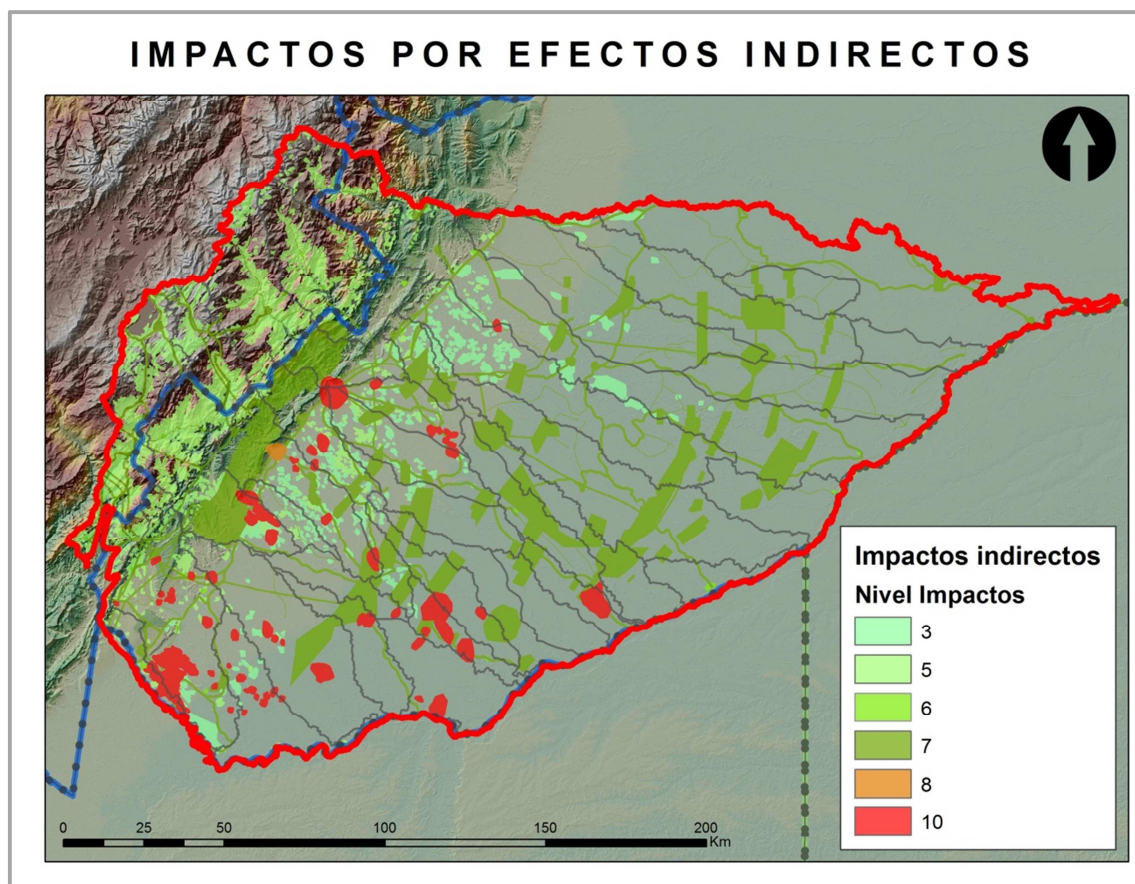


**Figura 35: Nivel de capacidad adaptativa promedio en las unidades de análisis**

## 5.4 Impactos por efectos indirectos

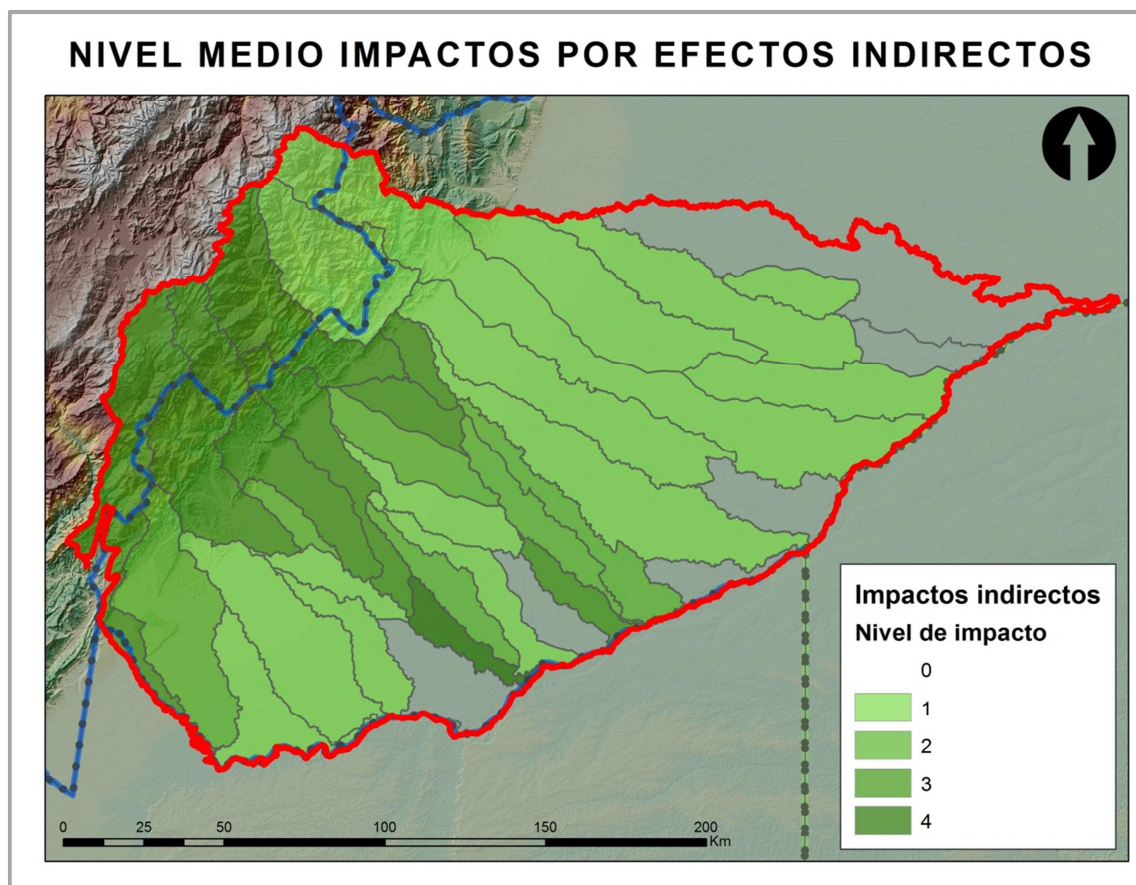
El 69.2% del área de estudio no tiene impactos por efectos indirectos, el 19,6% tienen impactos altos, el 7.8% impactos medios y el 3.4% impactos bajos. Las zonas más afectadas están en cercanías a centros urbanos con población alta (más de 100.000 habitantes) y a cultivos de palma. Las carreteras, los sitios de explotación y ductos de transporte de petróleo, tienen impactos medios en

extensiones pequeñas. En el piedemonte, las mayores afectaciones ocurren por plantaciones forestales, las cuales ocasionan impactos medios. Los cultivos de arroz y algunas poblaciones alcanzaron valores de impactos bajo (Figura 36).



**Figura 36: Nivel de impactos por efectos indirectos en el área de estudio**

Al calcular el valor promedio de los impactos para cada unidad de análisis, todas las áreas resultaron con niveles bajos (29 unidades) o nulos (6 unidades) (Figura 37). Algunas unidades que van desde el piedemonte hasta la alta montaña, resultaron con los mayores impactos, por la presencia de plantaciones forestales. Las áreas sin impactos están ubicadas en la cercanía del río Meta.

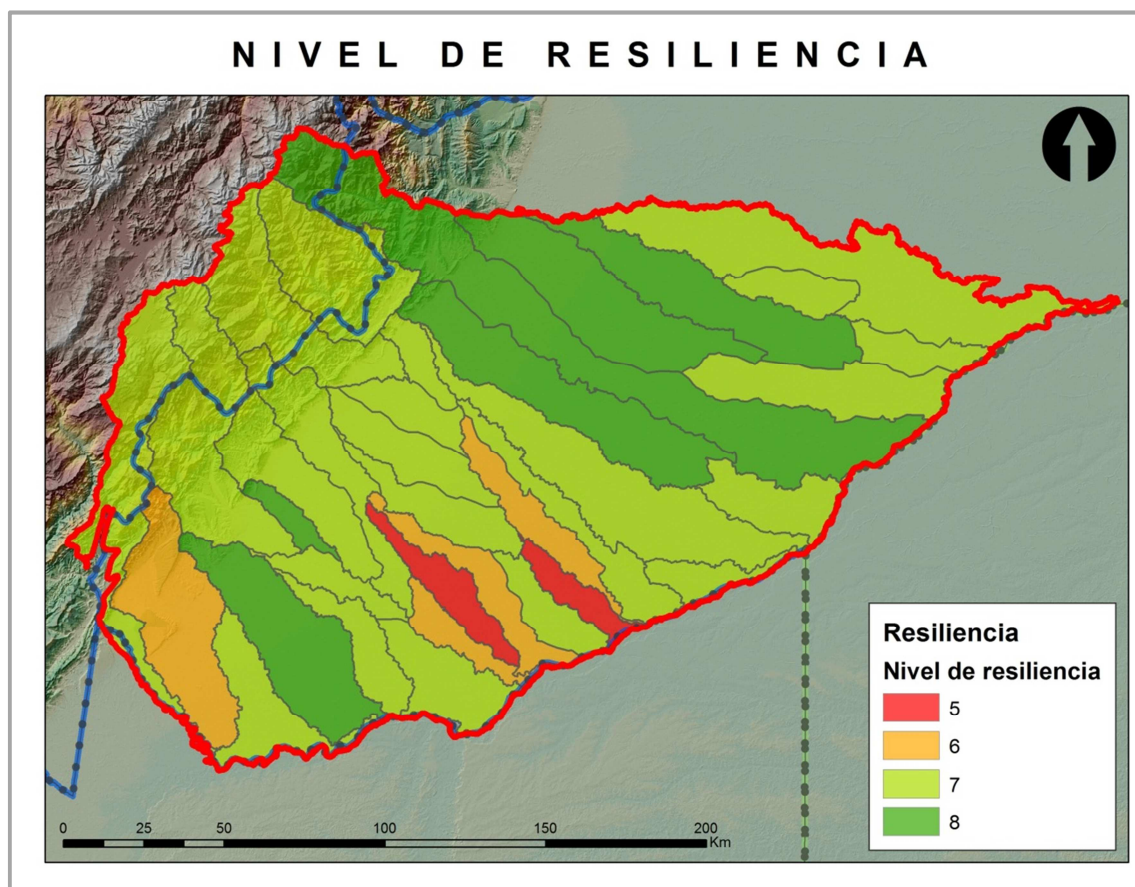


**Figura 37: Nivel de impactos por efectos indirectos en las unidades de análisis**



## 5.5 Resiliencia

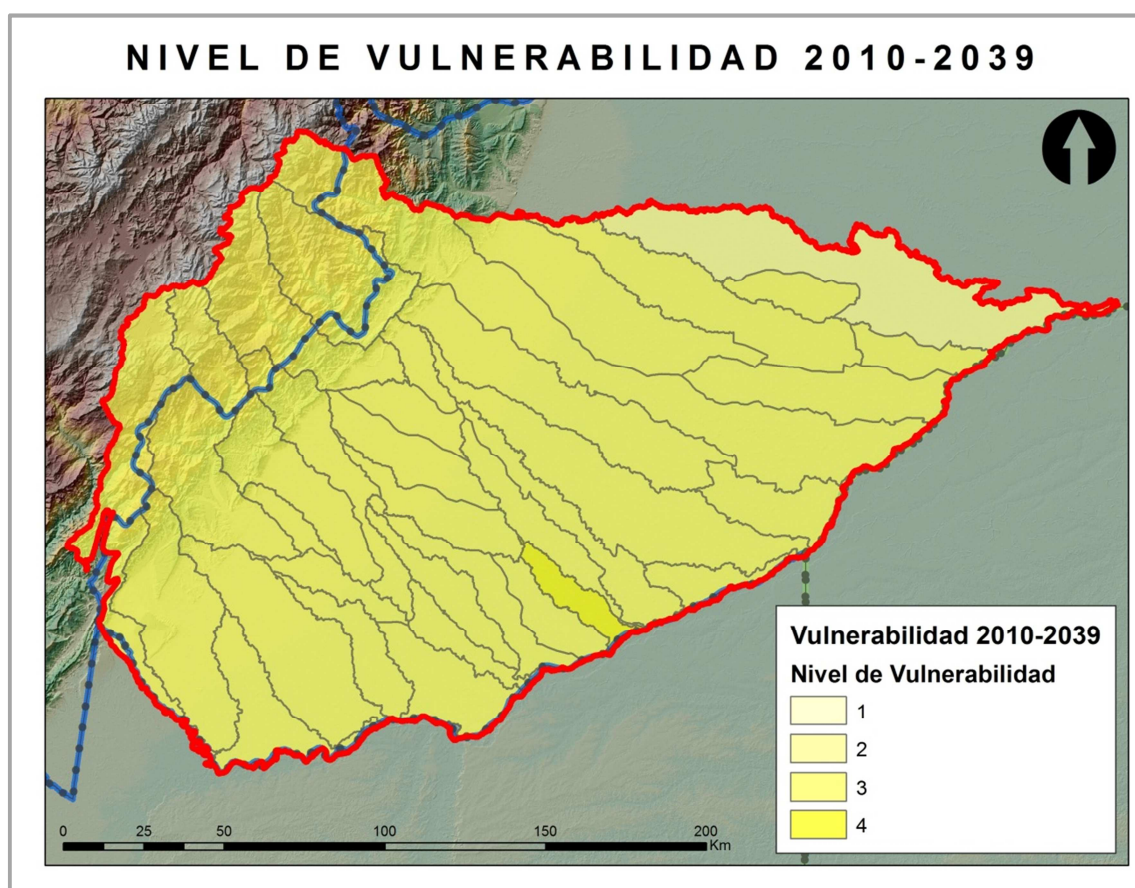
Al combinar el componente de capacidad adaptativa y el impacto por efectos indirectos por unidad de análisis, encontré que el área en general tiene una resiliencia media y alta, 29 unidades con valores medios y solo seis unidades con resiliencia alta (Figura 38). Las unidades con resiliencia ocupan grandes extensiones (entre 167 000 y 366 000 hectáreas) y cinturones altitudinales amplios (100 y 1200-3700 m). Las dos unidades con valores medio-bajos de resiliencia son el Caño Marematre y Tejemena, con poca superficie (35000 y 51000 hectáreas) y cercanos al río Meta.



**Figura 38: Nivel de resiliencia en las unidades de análisis**

## 5.6 Vulnerabilidad

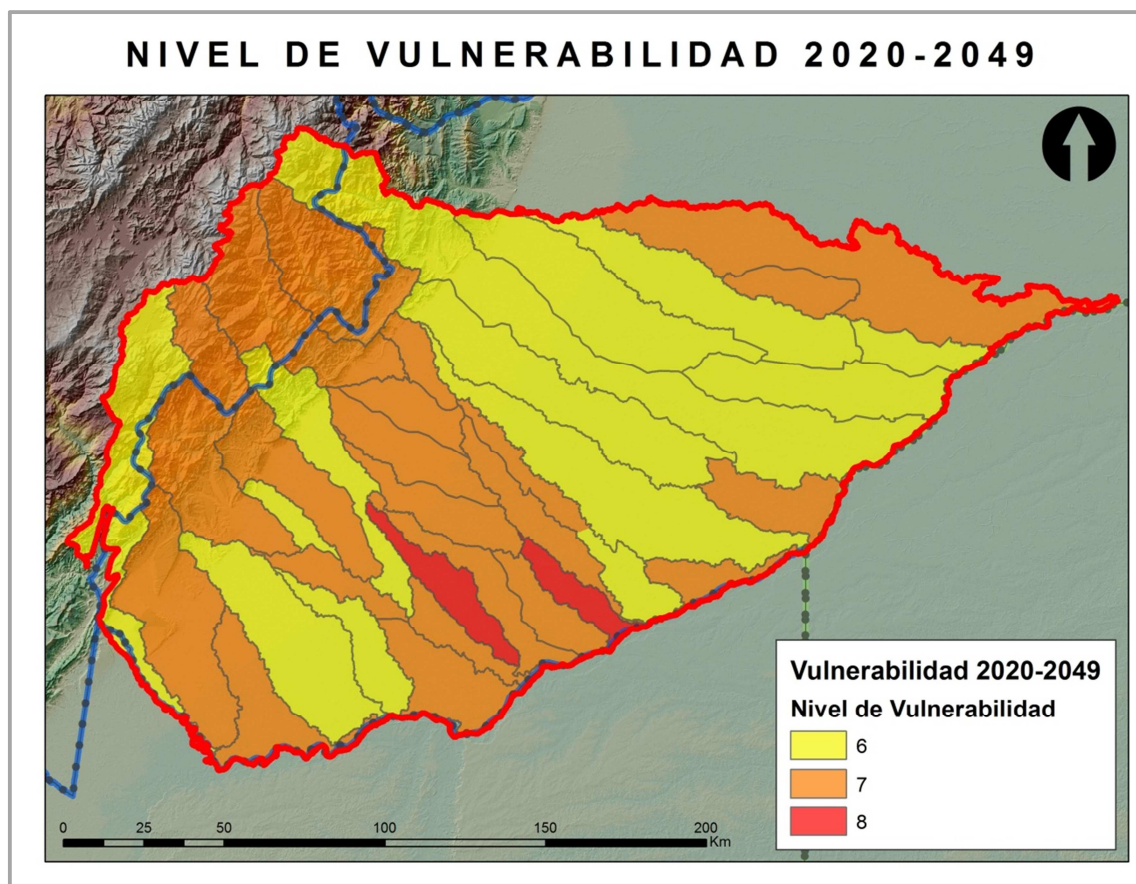
La combinación de los componentes resiliencia y exposición resultaron en un nivel bajo de vulnerabilidad para el periodo 2010-2039 (Figura 39), mientras que para el periodo 2020-2049, la vulnerabilidad fue media y alta (Figura 40). Para el periodo primer periodo la mayor parte del área de estudio presentó una vulnerabilidad de 3 y solo dos unidades tuvieron valores diferentes (1 y 4). La unidad Caño Maremare mostró una vulnerabilidad más alta comparada con el resto. Por su parte la unidad Caño La Hermosa, tuvo el menor valor de vulnerabilidad para el área de estudio, en este periodo.



**Figura 39: Nivel de vulnerabilidad en las unidades de análisis, periodo 2010-2039**

Para el periodo 2020-2049, dos unidades fueron altamente vulnerables: El Caño Maremare y el Caño Tejemena. El resto obtuvo valores medios. El Caño La Hermosa que en el anterior periodo mostró el menor valor de vulnerabilidad, tuvo

un valor medio para este periodo. Algunas unidades que ocupan zonas desde la llanura hasta el piedemonte y la alta montaña resultaron con una vulnerabilidad media (Figura 40).



**Figura 40: Nivel de vulnerabilidad en las unidades de análisis, periodo 2020-2049**

## 5.7 Sitios importantes para aves acuáticas

Seleccioné 13 sitios importantes, después de evaluar la abundancia y riqueza de aves acuáticas o la ocurrencia de actividades como descanso o reproducción. En la Tabla 12 y Figura 41, se muestran los sitios importantes y los criterios tenidos en cuenta para su selección. Cuatro sitios fueron seleccionados por tener una alta abundancia de aves acuáticas en julio y noviembre de 2012 (>500 individuos), un sitio fue seleccionado por tener una alta riqueza de aves acuáticas (>15 especies), seis sitios más fueron seleccionados por alta riqueza y abundancia y dos sitios, son áreas de reproducción de varias especies de aves acuáticas (Ruiz-Guerra et al. 2013).

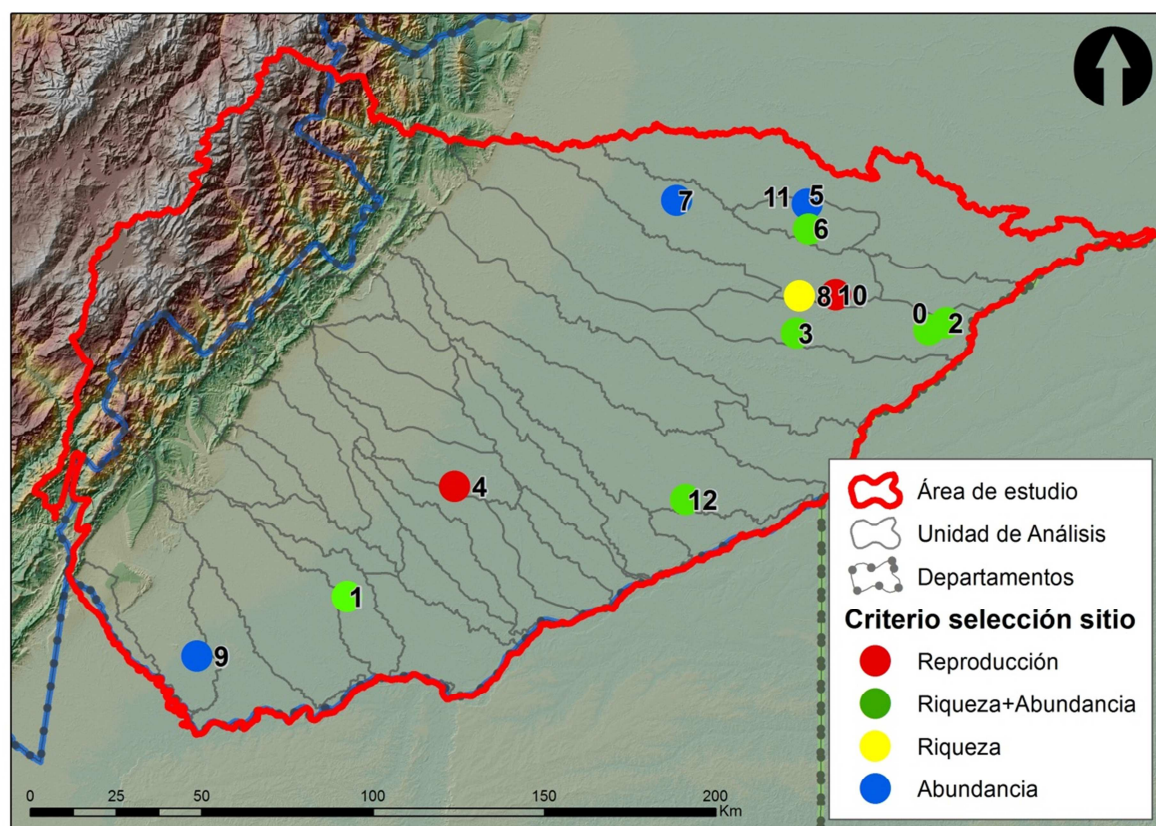
**Tabla 12: Sitios importantes para las aves acuáticas en la zona de estudio**

Importancia: criterio de selección de importancia del sitio

| ID mapa | Sitio importante       | Municipio      | Unidad de Análisis     | Importancia                      |
|---------|------------------------|----------------|------------------------|----------------------------------|
| 0       | Laguna El Lagunazo     | Trinidad       | Caño Yatea             | Riqueza y abundancia de especies |
| 1       | Estero Tres Moriches   | Mani           | Caño Bujumena          | Riqueza y abundancia de especies |
| 2       | Laguna El Boral        | Trinidad       | Caño Yatea             | Riqueza y abundancia de especies |
| 3       | Laguna Las Delicias    | Trinidad       | Caño Yatea             | Riqueza y abundancia de especies |
| 4       | Estero Banco Largo     | Orocue         | Caño Canacabare        | Sitio de reproducción            |
| 5       | Garcero Miramar        | Paz de Ariporo | Caño La Mula-El Venado | Abundancia de especies           |
| 6       | Laguna El Venado       | Paz de Ariporo | Caño La Mula-El Venado | Abundancia de especies           |
| 7       | La Victoria-Chaparrito | Paz de Ariporo | Caño Chiquito          | Abundancia de especies           |
| 8       | Estero Los Toros       | Trinidad       | Caño Chiquito          | Riqueza de especies              |
| 9       | Finca El Garcero       | Tauramena      | Rio Tua                | Abundancia de especies           |
| 10      | Garcero El Remache     | Trinidad       | Caño Chiquito          | Sitio de reproducción            |
| 11      | Estero El Venado       | Paz de Ariporo | Caño La Mula-El Venado | Riqueza y abundancia de especies |
| 12      | Parque Wisirare        | Orocue         | Caño Duya              | Riqueza y abundancia de especies |



## SITIOS IMPORTANTES PARA AVES ACUÁTICAS

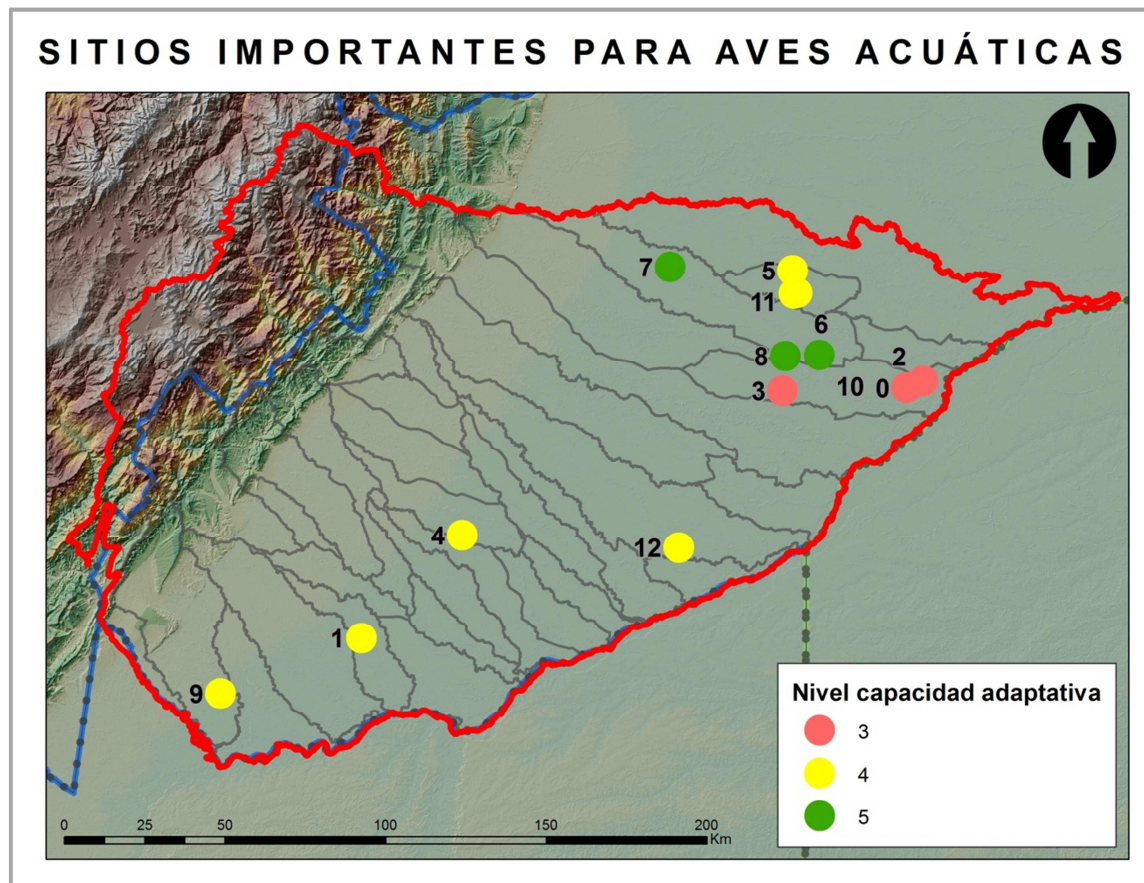


**Figura 41: Sitios importantes para aves acuáticas**

0: Finca El Lagunazo, 1: Estero Tres Moriches, 2: Laguna El Boral, 3: Laguna Las Delicias, 4: Estero Banco Largo, 5: Garcero Miramar, 6: Laguna El Venado, 7: La Victoria-Chaparrito, 8: Estero Los Toros, 9: Finca El Garcero, 10: Garcero El Remache, 11: Estero El Venado, 12: Parque Wisirare



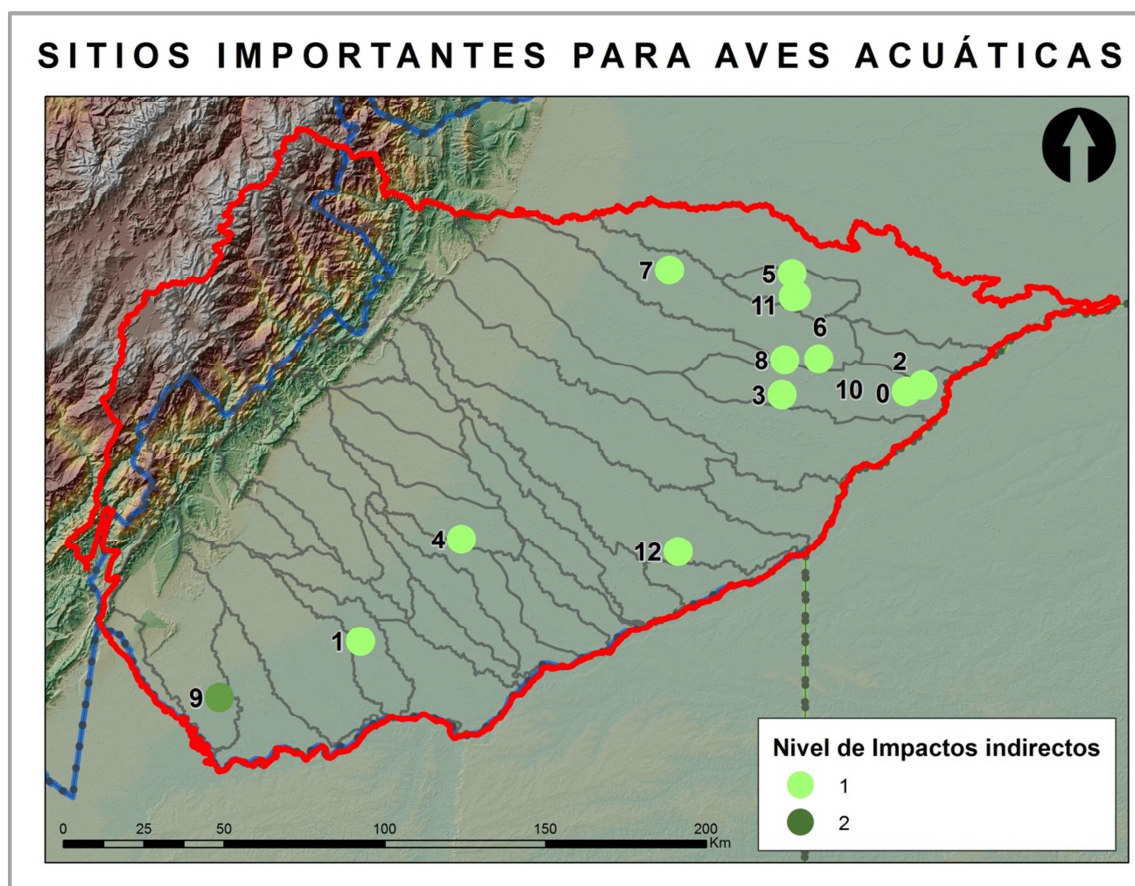
Tres de los 13 sitios tuvieron una capacidad adaptativa media y el resto baja (Figura 42). Los tres sitios con capacidad alta, se ubican en la zona norte de la región de estudio y corresponden a La Victoria-Chaparrito, Estero Los Toros y el Garcero El Remache. Estos tres sitios fueron seleccionados por diferentes criterios y pertenecen a la misma unidad de análisis. Presentaron niveles altos de capacidad adaptativa de pendiente y medio de cobertura vegetales y áreas de humedal. Otros tres sitios, la Finca El Lagunazo, la Laguna El Boral y la Laguna Las Delicias, están ubicados en la unidad Caño Yatea. Estos sitios tienen valores bajos de capacidad adaptativa, con rangos estrechos de precipitación y temperatura.



**Figura 42: Nivel de Capacidad adaptativa en sitios importantes para aves acuáticas**

0: Finca El Lagunazo, 1: Estero Tres Moriches, 2: Laguna El Boral, 3: Laguna Las Delicias, 4: Estero Banco Largo, 5: Garcero Miramar, 6: Laguna El Venado, 7: La Victoria-Chaparrito, 8: Estero Los Toros, 9: Finca El Garcero, 10: Garcero El Remache, 11: Estero El Venado, 12: Parque Wisirare

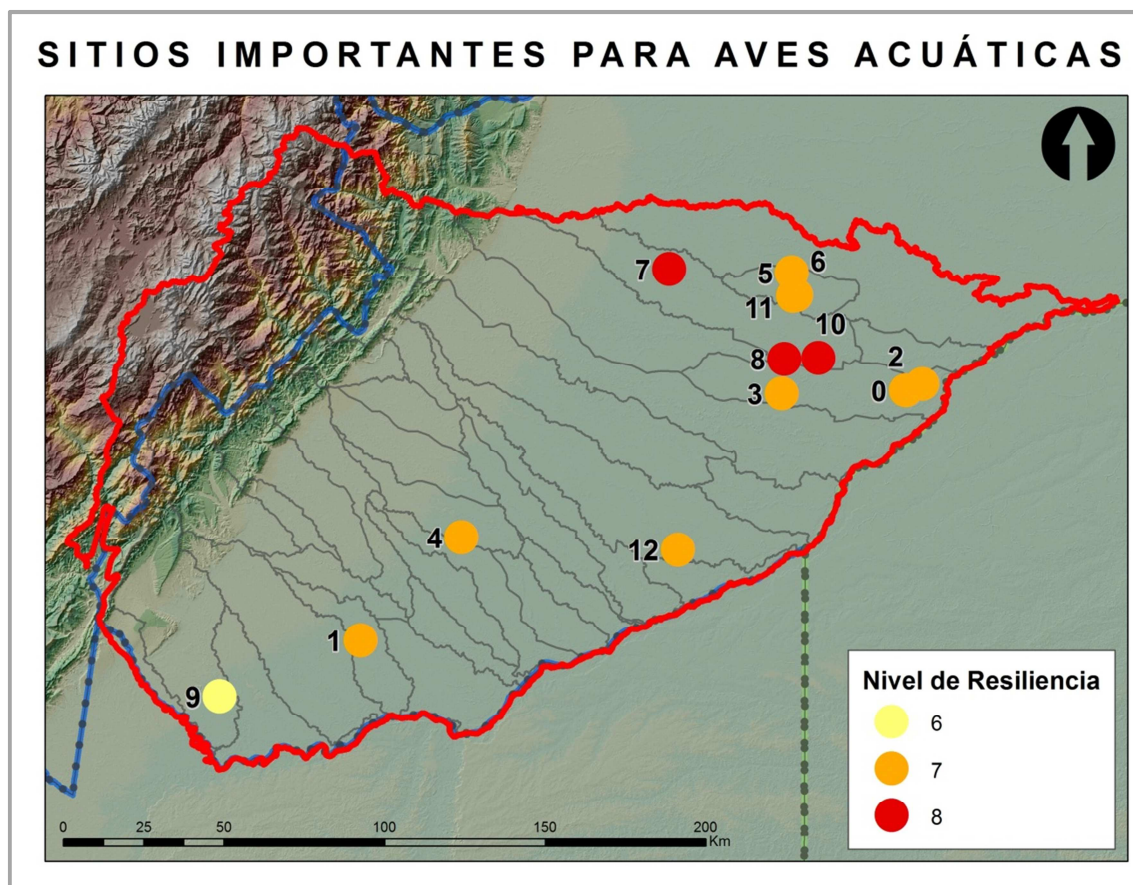
Todos los sitios tuvieron valores bajos de impactos por efectos indirectos. Solo un sitio, la Finca El Garcero, tiene un valor de impacto de dos. Este valor levemente mayor que el resto, puede deberse a la cercanía con plantaciones de palma ubicadas cerca de este sitio (Figura 43).



**Figura 43: Nivel de impactos por efectos indirectos en sitios importantes para aves acuáticas**

0: Finca El Lagunazo, 1: Estero Tres Moriches, 2: Laguna El Boral, 3: Laguna Las Delicias, 4: Estero Banco Largo, 5: Garcero Miramar, 6: Laguna El Venado, 7: La Victoria-Chaparrito, 8: Estero Los Toros, 9: Finca El Garcero, 10: Garcero El Remache, 11: Estero El Venado, 12: Parque Wisirare

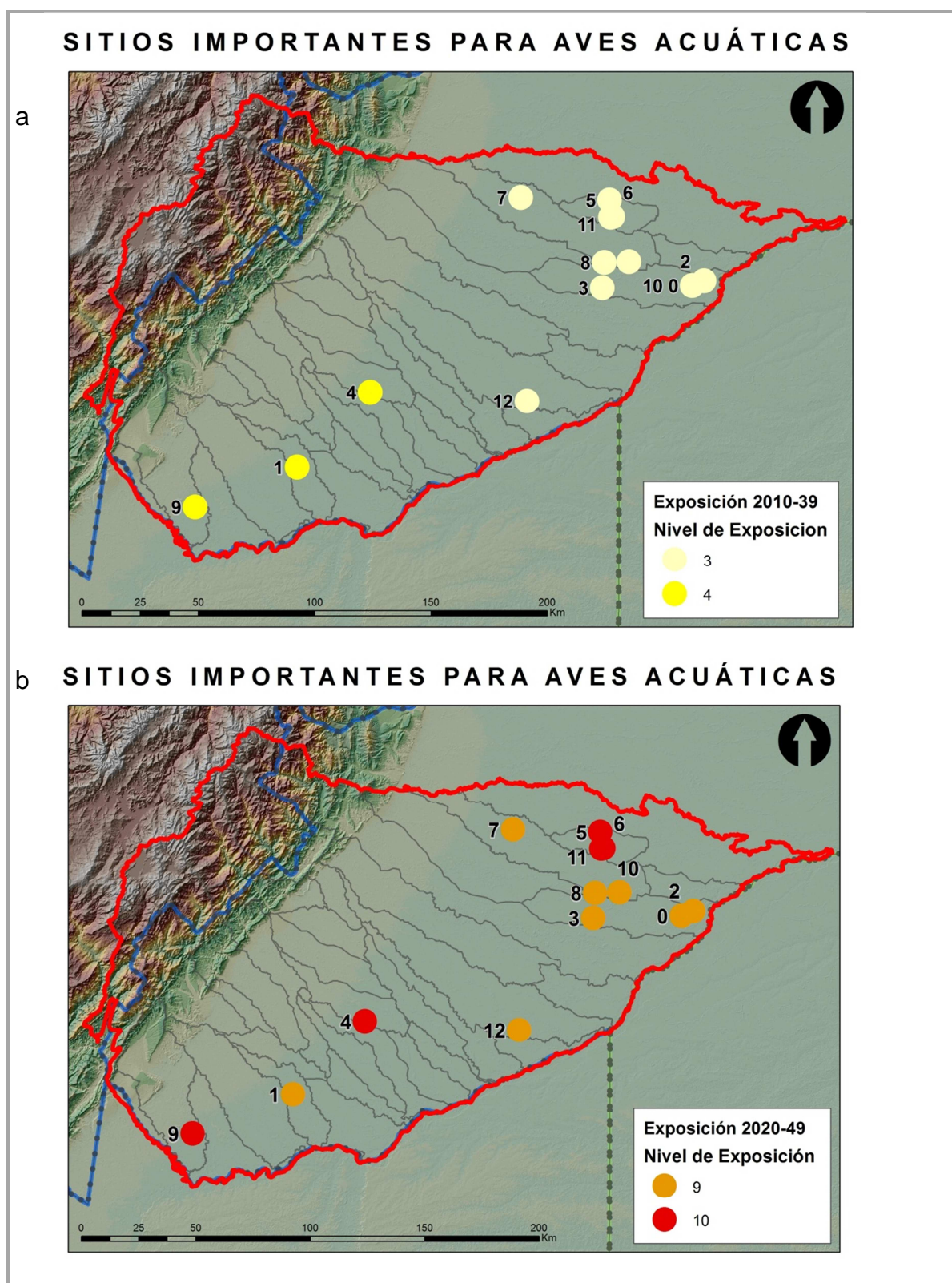
En cuanto a la resiliencia, los tres sitios que obtuvieron valores medios de capacidad adaptativa, presentaron niveles altos de este componente. Los diez sitios restantes, resultaron con niveles medios. El sitio Finca El Garcero que tuvo un nivel de impacto de 2, evidenció un nivel de resiliencia menor que el resto (Figura 44).



**Figura 44: Nivel de resiliencia de los sitios importantes para aves acuáticas**  
 0: Finca El Lagunazo, 1: Estero Tres Moriches, 2: Laguna El Boral, 3: Laguna Las Delicias, 4: Estero Banco Largo, 5: Garcero Miramar, 6: Laguna El Venado, 7: La Victoria-Chaparrito, 8: Estero Los Toros, 9: Finca El Garcero, 10: Garcero El Remache, 11: Estero El Venado, 12: Parque Wisirare

En cuanto a la exposición para el periodo 2010-2039 todos los sitios tendrán valores bajos, en contraste con el periodo 2020-2049, que mostró una exposición alta para todos los sitios. En el primer periodo, tres sitios que están en la zona sureste del área de estudio, Finca El Garcero, Estero Tres Moriches y Estero Banco Largo, resultaron con un nivel 4 de exposición, es decir más alto que el nivel de los otros sitios. Los demás sitios en el noreste del área, tendrán una exposición de 3 (Figura 45a).





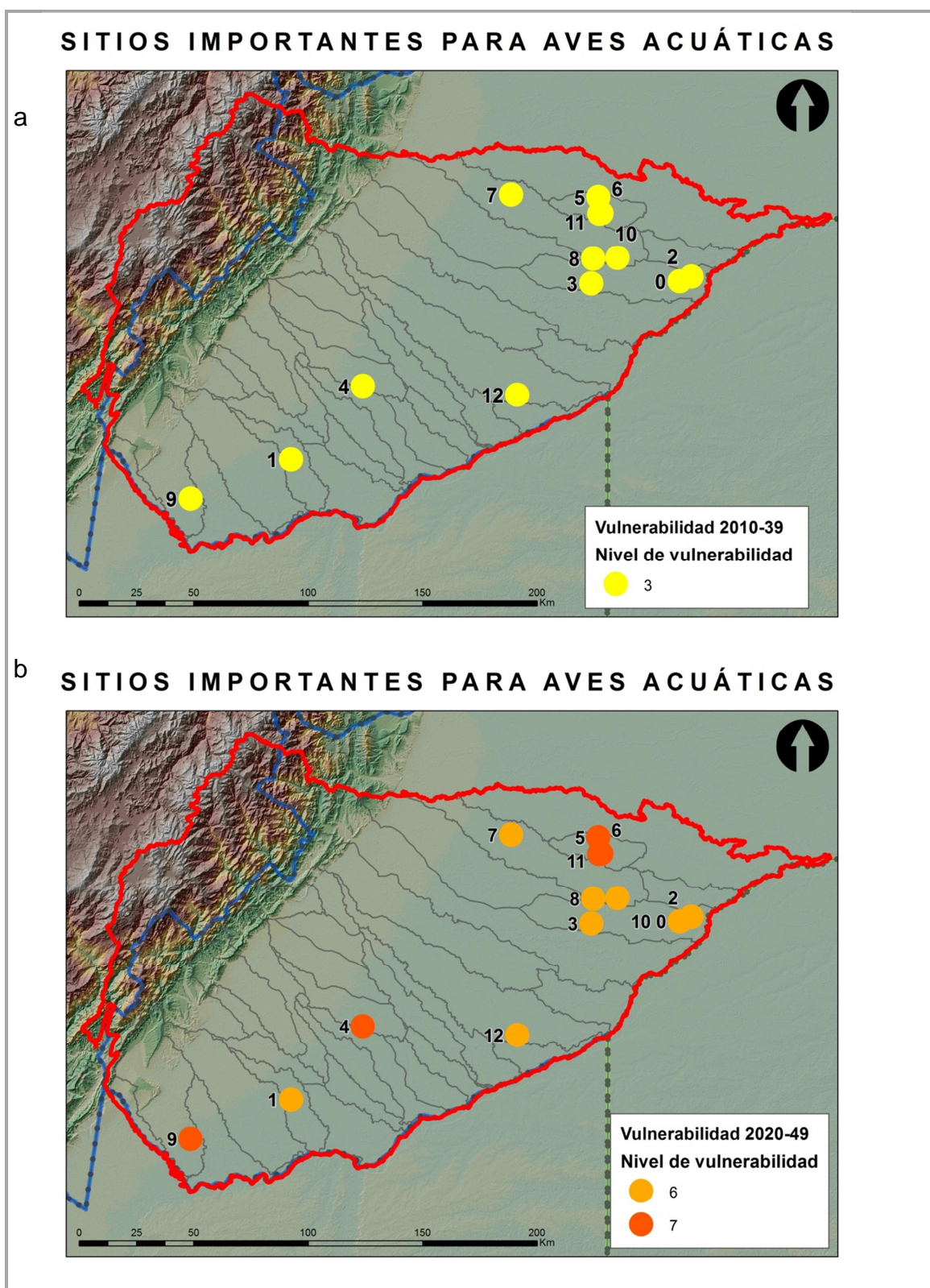
**Figura 45: Nivel de Exposición de los sitios importantes para aves acuáticas**

a. Periodo 2010-2039. b. Periodo 2020-2049

0: Finca El Lagunazo, 1: Estero Tres Moriches, 2: Laguna El Boral, 3: Laguna Las Delicias, 4: Estero Banco Largo, 5: Garcero Miramar, 6: Laguna El Venado, 7: La Victoria-Chaparrito, 8: Estero Los Toros, 9: Finca El Garcero, 10: Garcero El Remache, 11: Estero El Venado, 12: Parque Wisirare

En el caso del periodo 2020-2049 (Figura 45b), dos de los sitios con exposición alta en el periodo 2010-2039, obtuvieron valores de vulnerabilidad máximos, el Estero Banco Largo y Finca El Garcero. Adicionalmente, dos sitios ubicados en la unidad La Mula-El Venado, resultaron también con valores altos de exposición. Esta unidad, estará altamente afectada por cambios en la temperatura y en menor medida por la precipitación en este periodo (ver Figura 28). Los sitios restantes, tendrán valores de exposición alto, pero no máximos.

Al evaluar la vulnerabilidad de los sitios, para el periodo 2010-2039, todos obtuvieron una vulnerabilidad baja (Figura 46a). Por otra parte, para el periodo 2020-2049, la vulnerabilidad pasa a nivel medio. Los sitios que obtuvieron un nivel de exposición máximo en este periodo, tendrán un valor de vulnerabilidad de 7 y el resto de 6 (Figura 46b).



**Figura 46: Nivel de Vulnerabilidad de los sitios importantes para aves acuáticas**

a. Período 2010-2039. b. Período 2020-2049

0: Finca El Lagunazo, 1: Estero Tres Moriches, 2: Laguna El Boral, 3: Laguna Las Delicias, 4: Estero Banco Largo, 5: Garcero Miramar, 6: Laguna El Venado, 7: La Victoria-Chaparrito, 8: Estero Los Toros, 9: Finca El Garcero, 10: Garcero El Remache, 11: Estero El Venado, 12: Parque Wisirare



## 6 CONCLUSIONES

### *Sobre la exposición*

Encontré un aumento de la temperatura anual promedio para los dos periodos futuros estudiados. Este aumento expresado en grados centígrados estará entre 1 y 1.55°C para el primer periodo y entre 1.1 y 1.7 °C para el segundo periodo, si tenemos en cuenta que la temperatura en la región varía entre 25 y 27°C.

De igual manera, la precipitación anual promedio en el área de estudio aumentará en los dos periodos. Sin embargo, las variaciones interanuales no siempre serán de aumento: durante los meses secos entre diciembre y marzo, la precipitación aumentará hasta 120 mm, mientras que en los meses lluviosos la precipitación permanecerá igual. Para el periodo, 2020-2049, en los meses lluviosos, se presentarán disminuciones de hasta 60 a 120 mm de precipitación y aumentos de hasta 20 mm en la época seca.

La variable precipitación, contribuye en gran medida con los niveles de vulnerabilidad obtenidos en el segundo periodo. Esto además es consistente con los patrones de esta variable climática en la actualidad, ya que es considerada como limitante en la dinámica hídrica de la región. Para la región encontré que en el periodo 2020-2049, el pico de precipitación ocurrirá un mes después que ocurre en la actualidad (pasara de junio a julio) (ver Figura 23).

El patrón espacial en el área de estudio se mantiene entre las dos épocas. La porción suroriente será la que presente la mayor exposición. En el primer periodo alcanzará un nivel bajo-medio y en el periodo 2020-2049, niveles medios a altos. Algunas unidades de análisis que tienen zonas de alta montaña, presentarán valores medios en los dos periodos, comparados con el resto del área.

En cuanto a los sitios importantes, en el periodo 2010-2039 todos tienen un nivel de exposición bajo; en contraste, todos los sitios en 2020-2049 tienen un nivel de exposición alto. De nuevo, esto ocurre por efecto del cambio del volumen de la precipitación en el área de estudio y en el aumento de la temperatura en algunas unidades de estudio ubicadas en el noreste del área de estudio.

### ***Sobre la capacidad adaptativa, los efectos indirectos y la resiliencia***

La capacidad adaptativa de la zona de estudio resultó baja a media. La mitad de las unidades de análisis tienen una capacidad adaptativa media y las restantes baja. La variable que más contribuye a tener niveles medios de capacidad adaptativa en las unidades, es la pendiente. En cambio, las variables rango de precipitación y temperatura, tienen valores bajos cuando la capacidad adaptativa también es baja.

Casi todas las unidades de análisis tienen pendientes bajas que favorecen la acumulación de agua en el terreno y el 90% de las unidades tienen áreas de humedales mayores al 50% de la unidad de análisis. Estos resultados aumentan la capacidad adaptativa de las unidades de análisis. Sin embargo, el 30% de las unidades de análisis tienen muchos tipos de ecosistemas y de suelos, y el 63% y el 69% de las unidades tienen rangos estrechos de temperatura y precipitación respectivamente.

El aumento de la temperatura en los periodos futuros, se encuentra entre los valores del rango de precipitación y temperatura calculados como variables de capacidad adaptativa. Es decir, en la actualidad, por lo menos en periodos cortos de tiempo, las unidades de análisis y el área de estudio en general, están expuestos a las condiciones futuras de precipitación y temperatura estimadas para los dos periodos evaluados. Sin embargo, esto no da cuenta de la intensidad o frecuencia de los cambios que también estarían afectando a los sistemas y que a la final, podrían aumentar la vulnerabilidad de los sitios.

La condición del paisaje por impactos indirectos al cambio climática resultó entre baja y nula. La variable que más afectó, son las zonas destinadas a las facilidades y actividades mineras y la variable que obtuvo valores más altos de impacto, fueron los centro urbanos poblaciones y sus alrededores. La finca El Garcero, cercana a plantaciones de palma, tuvo valores de exposición más altos que el resto de sitios seleccionados. En el periodo 2020-2049, este sitio también tuvo un nivel de vulnerabilidad alto.



La cuantificación de los impactos indirectos tiene varias imprecisiones en su espacialización, ya que existen pocos estudios que cuantifiquen la superficie de impacto de estos tensores. Así mismo, esta variable muestra solamente el impacto local y no algunos otros impactos derivados a nivel regional. Es así, que para el área de estudio los niveles de impactos fueron bajos y pueden estar siendo subestimados. Otro factor que puede estar evitando que esta variable tenga mayor participación en la evaluación, es que estos impactos no consideran cambios en el tiempo, como crecimiento poblacional o de infraestructura, ni cambios ecológicos en los sitios.

La combinación de los impactos indirectos y la capacidad adaptativa, en la resiliencia de sistema, resultó en niveles medios en cerca del 90% de las unidades y en valores altos en las restantes. En cuanto a los sitios importantes, 3 de ellos tuvieron niveles altos de resiliencia y los restantes 10, niveles medios.

### ***Sobre la vulnerabilidad de los sitios.***

Para el periodo 2010-2039, la vulnerabilidad resultante para las unidades de estudio será baja, mientras que para el segundo periodo, entre 2020 y 2049, el nivel de vulnerabilidad será medio en el 94% de las unidades y alto en el otro 6%.

En el caso de los sitios importantes, en el primer periodo, todas las unidades de análisis en donde se ubican los sitios, tuvieron una vulnerabilidad baja y en el siguiente periodo, la vulnerabilidad fue media, en todos los casos.

## 7 REFERENCIAS

- AHN, IAvH, TNC e IDEAM. (2007). Planeación ambiental del sector de hidrocarburos para la conservación de la biodiversidad en áreas de interés para la Agencia Nacional de Hidrocarburos (Llanos-Colombia). Agencia Nacional de Hidrocarburos, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, The Nature Conservancy e Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales. Bogotá, Colombia. 10 pp.
- Andrade-Pérez G. I y Corzo-Mora G. A. (2011). ¿Qué y dónde Conservar? Parques Nacionales Naturales de Colombia- Mesa Nacional de Prioridades de Conservación Memorando de Entendimiento del Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Bogotá, Colombia 44 pp.
- BirdLife International y Conservation International. (2005). Áreas Importantes para la Conservación de las Aves en los Andes Tropicales: sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad. BirdLife International (Serie de Conservación de BirdLife No. 14) Quito, Ecuador.
- Comer, P. J., Young B., Schulz K., Kittel G., Unnasch B., Braun D., Hammerson G., Smart L., Hamilton H., Auer S., Smyth R. y Hak J. (2012). Climate Change Vulnerability and Adaptation Strategies for Natural Communities: Piloting methods in the Mojave and Sonoran deserts. Report to the U.S. Fish and Wildlife Service. NatureServe, Arlington, VA.
- Departamento Nacional de Planeación -DNP. (2011). Plan Nacional de desarrollo 2010-2014-Resumen. Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, Colombia.
- Fedearroz. (2012). Dinámica del sector arrocero de los Llanos Orientales de Colombia 1999-2011. Fondo Nacional del Arroz, Fedearroz. Bogotá Colombia.
- Garavito-Fonseca J., Suárez C. F., Bravo A. M., Vargas R., Cuadros L., Córdoba M., Miranda L., Martínez J. y Usma J. S. (2011). Descripción del medio natural del Departamento del Casanare. En: Usma, J.S. y Trujillo F. (Editores). Biodiversidad del Casanare: Ecosistemas Estratégicos del Departamento. Gobernación de Casanare - WWF Colombia. Bogotá, Colombia. 286 pp.
- Gardali T., Seavy N. E., DiGaudio R. T. y Commarck L. A. (2012). A climate change vulnerability assessment of California's at-risk birds. Plos One Vol 7 (3): 1-13.

- IAvH, WWF-Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle y Universidad Nacional. (2010). Biodiversidad de la Cuenca del Orinoco: Bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recurso Biológicos Alexander von Humboldt, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto de Estudios de la Orinoquía, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá Colombia. 605 pp.
- IDEAM. (1998). Medio ambiente en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales. Bogotá, Colombia. 544 pp.
- IDEAM, IGAC, IAvH, Invermar, I. Sinchi e IIAP. (2007). Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico Jhon von Neumann, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andreis e Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi. Bogotá, Colombia 276 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2000). Emission Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). Tercer Informe de Evaluación Cambio Climático 2001. La Base Científica. Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM y PNUMA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A (p. 104 pp). Ginebra, Suiza.
- Johnston-González R. y Eusse-González, D. (2009). Sitios importantes para aves playeras en Colombia. Asociación Calidris. Cali. Colombia. 36 pp.
- Johnston-González R., Ruiz-Guerra C. J., Eusse-González D., Castillo-Cortés L. F., Cifuentes-Sarmiento Y., Falk-Fernández P. y Ramírez De Los Ríos V. (2010). Plan de conservación de aves playeras en Colombia. Asociación Calidris, Cali, Colombia. 40 pp.
- Jones R., Noguer M., Hassell D., Wilson S., Jenkins G. & Mitchell J. (2004). Generating High Resolution Climate Scenarios using PRECIS. MetOffice. Hadley Center. United Kingdom.

- Lasso, C. A., Usma J. S., Trujillo F. y Rial A. (Editores). (2010). Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto de Estudios de la Orinoquía (Universidad Nacional de Colombia). Bogotá, Colombia. 609 pp.
- MMA. (2002). Política Nacional para Humedales interiores de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, Colombia. 1era Edición.
- Marshall N.A., Marshall P.A., Tamelander J., Obura D., Malleret-King D. and Cinner J.E. (2009). A Framework for Social Adaptation to Climate Change; Sustaining Tropical Coastal Communities and Industries. Gland, Switzerland, IUCN. 36 pp
- MAVDT e IDEAM. (2010). Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Ministro de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia.
- Naranjo L. G. y Amaya J.D. (2009). Plan nacional de las especies migratorias. Diagnostico e identificación de acciones para la conservación y manejo sostenible de las especies migratorias de la biodiversidad colombiana. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y WWF-Colombia. Cali, Colombia. 214 pp
- Pabón, J., Eslava J. y Gómez R. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. Meteorol. Colomb. 4:47-59. Bogotá, D.C. – Colombia.
- Quesne T. L., Matthews J. H., Heyden C. V. D., Levine E., & Mcsweeney C. (2010). Flowing forward freshwater ecosystem adaptation to climate change in water resources management and biodiversity conservation. World Bank- Water Partnership Program y WWF-UK. 69 pp.
- Ramirez, J., y Jarvis, A. (2010). Downscaling global circulation model outputs: the delta method. Decision and policy analysis Working. Paper No.1. DAPA, CIAT, Cali, Colombia. <http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage/docs/Downscaling-WP-01.pdf>. Acceso abril de 2012.
- Renjifo L. M, Franco-Amaya A. M., Amaya-Espinel J. D., Kattan G. H. y López-Lanus B. (2002). Libro rojo de aves de Colombia. Serie libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia. 562 pp.

- Restrepo S., Lentino M., y Naranjo L. G. (2010). Aves, Capítulo 9. En: Lasso, C. A., Usma J. S., Trujillo F. y Rial A. (Editores). Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto de Estudios de la Orinoquía (Universidad Nacional de Colombia). Bogotá, Colombia. 609 pp.
- Romero M., Galindo G., Otero J. y Armenteras D. (2004). Mapa de ecosistemas de Orinoquía. Formato shape, escala 1:100.000. Instituto de Investigación en Recursos biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia
- Rosales J., Suarez C. y Lasso C. A. (2010). Descripción del medio natural de la cuenca del Orinoco. En: Lasso, C. A., Usma J. S., Trujillo F. y Rial A. (Editores). Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto de Estudios de la Orinoquía (Universidad Nacional de Colombia). Bogotá, Colombia. 609 pp.
- Ruiz-Guerra, C. J., Eusse-González D. y Arango C. (2013). Abundancia, distribución y algunos aspectos sobre la reproducción de aves acuáticas de la sabana inundable del Meta y Casanare, Orinoquía colombiana. Biota colombiana, en prensa. Bogotá, Colombia.
- Ruiz-Murcia J.F. (2007). Escenarios de Cambio Climático, algunos modelos y resultados de Lluvia para Colombia, bajo el escenario A1B. IDEAM-Meteo/003-2007. Nota técnica. Bogotá, Colombia.
- Usma J.S., y Trujillo F. (Editores). (2011). Biodiversidad del Casanare: Ecosistemas Estratégicos del Departamento. Gobernación de Casanare - WWF Colombia. Bogotá, Colombia, 286 pp.
- Velásquez Restrepo A. A y Rosales Climent, C. I. (2003). Escudriñando en los desastres a todas las escalas. En: Colombia 1999. Editorial Feriva. 120 pp.
- WWF y Fundación Natura. (2010). Cambio climático en un paisaje vivo: Vulnerabilidad y adaptación en la Cordillera Real Oriental de Colombia, Ecuador y Perú. WWF Colombia y Fundación Natura 2010. Santiago de Cali, Colombia.
- Zamudio J. A., Ortega L. F. y Castillo L. F. (2011). Las aves del Casanare. En: Usma, J.S., & F. Trujillo (Editores). 2011. Biodiversidad del Casanare: Ecosistemas Estratégicos del Departamento. Gobernación de Casanare - WWF Colombia. Bogotá, Colombia. 286 pp.

## ANEXO 1: TIPOS DE SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

### LEYENDA DE LA FIGURA 9

| ID  | DRENAJE               | PROFUNDIDA                      | PAISAJE      | CLASIFICACIÓN  |
|-----|-----------------------|---------------------------------|--------------|--|
| EMB | Excesivamente Drenado | Muy Superficial < 20cms         | Montaña      | Typic Cryorthents,Lithic Cryumbrepts,Afloramientos rocosos |
| KMA | Bien Drenado          | Superficial < 40cms             | Montaña      | Lithic Troorthents,Typic Dystropepts,Afloramientos rocosos |
| PMA | Bien Drenado          | Superficial < 40cms             | Montaña      | Lithic Troorthents   |
| PMB | Bien Drenado          | Moderadamente Profundo 40-80cms | Montaña      | Oxic Dystropepts,Typic Troorthents                         |
| PMC | Bien Drenado          | Moderadamente Profundo 40-80cms | Montaña      | Typic Dystropepts,Typic Troorthents                        |
| VAA | Bien Drenado          | Muy Profundo > 120cms           | Altiplanicie | Ustoxic Dystropepts  |
| VAB | Excesivamente Drenado | Moderadamente Profundo 40-80cms | Altiplanicie | Typic Ustorthents,Ustic Dystropepts                        |
| VAC | Excesivamente Drenado | Moderadamente Profundo 40-80cms | Altiplanicie | Typic Ustorthents,Typic Ustipsamments                      |
| VAD | Imperfecto            | Superficial < 40cms             | Altiplanicie | Fluventic Dystropepts                                      |
| VAE | Excesivamente Drenado | Muy Superficial < 20cms         | Altiplanicie | Typic Ustorthents  |
| VLA | Bien Drenado          | Moderadamente Profundo 40-80cms | Lomerio      | Ustic Dystropepts,Typic Ustorthents                        |
| VLB | Bien Drenado          | Profundo 80-120cms              | Lomerio      | Vertic Dystropepts   |
| VLC | Excesivamente Drenado | Muy Superficial < 20cms         | Lomerio      | Miscelaneo Erosionado                                      |
| VLD | Bien Drenado          | Profundo 80-120cms              | Lomerio      | Ustoxic Dystropepts  |
| VLE | Bien Drenado          | Moderadamente Profundo 40-80cms | Lomerio      | Typic Ustorthents  |
| VMA | Bien Drenado          | Superficial < 40cms             | Montaña      | Typic Dystropepts,Typic Troorthents                        |
| VMB | Excesivamente Drenado | Muy Superficial < 20cms         | Montaña      | Lithic Troorthents   |
| VPA | Bien Drenado          | Profundo 80-120cms              | Piedemonte   | Fluventic Dystropepts,Typic Troorthents                    |
| VPB | Bien Drenado          | Profundo 80-120cms              | Piedemonte   | Oxic Dystropepts,Vertic Tropaquepts,Aeric Tropaquepts      |
| VRA | Mal Drenado           | Superficial < 40cms             | Planicie     | Plinthic Tropaquepts,Typic Quartzipsamments                |

| ID  | DRENAJE      | PROFUNDIDA                      | PAISAJE  | CLASIFICACIÓN  |
|-----|--------------|---------------------------------|----------|--|
| VRB | Mal Drenado  | Muy Superficial < 20cms         | Planicie | Vertic PlinthicTropaquepts                                 |
| VRC | Mal Drenado  | Muy Superficial < 20cms         | Planicie | Plinthic Tropaquepts                                       |
| VRD | Mal Drenado  | Superficial < 40cms             | Planicie | Typic Tropaquepts  |
| VRE | Bien Drenado | Superficial < 40cms             | Planicie | Typic Tropaquepts,Ustic Quartzipsamments,Aeric Tropaquepts |
| VRF | Bien Drenado | Profundo 80-120cms              | Planicie | Oxic Dystropepts   |
| VRG | Bien Drenado | Profundo 80-120cms              | Planicie | Ustic Quartzipsamments,Tropaquodic Quartzipsamments        |
| VVA | Bien Drenado | Moderadamente Profundo 40-80cms | Valle    | Typic Troporthents,Typic Dystropepts                       |
| VVB | Bien Drenado | Superficial < 40cms             | Valle    | Fluventic Dystropepts,Typic Tropofluvents                  |
| VVC | Imperfecto   | Superficial < 40cms             | Valle    | Typic Tropofluvents,Tropic Fluvaquents                     |
| VVD | Inundable    | Superficial < 40cms             | Valle    | Fluventic Dystropepts,Tropic Fluvaquents                   |
| VVE | Imperfecto   | Moderadamente Profundo 40-80cms | Valle    | Fluventic Eutropepts,Typic Tropofluvents                   |
| VVF | Inundable    | Superficial < 40cms             | Valle    | Fluvaquentic Eutropepts,Tropic Fluvaquents                 |
| VVG | Inundable    | Superficial < 40cms             | Valle    | Vertic Tropaquepts,Tropic Fluvaquents                      |
| VVH | Inundable    | Superficial < 40cms             | Valle    | Miscelaneo de playones                                     |